

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Zudič, E., 2013. Požarna zaščita lesenih konstrukcij. Diplomski nalogi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Schnabl, S.): 47 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Zudič, E., 2013. Požarna zaščita lesenih konstrukcij. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Schnabl, S.): 47 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

PRVOSTOPENJSKI
ŠTUDIJSKI PROGRAM OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO (VS)

GRADBENIŠTVO /
ORGANIZACIJA

Kandidatka:

ELEN ZUDIČ

POŽARNA ZAŠČITA LESENIH KONSTRUKCIJ

Diplomska naloga št.: 39/OG-MO

FIRE PROTECTION OF TIMBER STRUCTURES

Graduation thesis No.: 39/OG-MO

Mentor:

doc. dr. Simon Schnabl

Predsednik komisije:

doc. dr. Tomo Cerovšek

Ljubljana, 27. 09. 2013

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

Ta stran je namenoma prazna.

IZJAVE

Podpisana Elen Zudič izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »Požarna zaščita lesenih konstrukcij«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice UL FGG.

Ljubljana, september 2013

Elen Zudič

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.011.1:614.841(043.2)
Avtor:	Elen Zudič
Mentor:	Doc. dr. Simon Schnabl
Naslov:	Požarna zaščita lesenih konstrukcij
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – visokošolski študij
Obseg in oprema:	47 str., 5 pregl., 10 graf., 6 sl.
Ključne besede:	Požarna odpornost, požarna zaščita, vrste požarnih zaščit, leseni steber, mavčno kartonske plošče, kamena volna, lesene plošče, intumescentne barve

Izvleček:

Lesene konstrukcije so že od nekdaj prisotne v gradbeništvu. Les velja za enega izmed bolj primernih materialov za gradnjo požarno varnih objektov. Težava je, da kljub ugodnemu obnašanju v primeru izpostavljenosti ognju, les spada med gorljive materiale. Ravno ta lastnost je bistvena pri lesenih elementih. Na eni strani lesena konstrukcija predstavlja dodatno kurilno zalogo v primeru požara, na drugi strani zaradi načina gorenja lesa, zunanja plast elementa zogleni in tako zagotovi požarno zaščito jedru. Zoglenela plast onemogoča dotok kisika, ki je potreben za gorenje plinov, ki se proizvajajo ob segrevanju lesa. Za podaljšanje časa odpornosti lesene konstrukcije se v praksi uporabljajo različna požarna izolacijska sredstva. Izolacijski materiali se zelo razlikujejo glede na učinkovitost in izgled. Pregledali bomo štiri osnovne vrste požarne zaščite in primerjali njihov učinek na požarno odpornost za leseni steber. Z uporabo programa Microsoft Excel sem izdelala programsko orodje za izračun požarne odpornosti lesenih stebrov z možnostjo upoštevanja različnih požarnih zaščitnih sredstev. Ugotovimo, da različna požarna zaščitna sredstva pomembno prispevajo k požarni odpornosti lesenega stebra, vendar ne v enaki meri. Na osnovi rezultatov lahko zaključimo, da so v obravnavanem primeru mavčno kartonske plošče tipa DF najbolj protipožarno učinkovite.

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC:	624.011.1:614.841(043.2)
Author:	Elen Zudič
Supervisor:	Assist. Prof. Simon Schnabl Ph. D.
Title:	Fire protection of timber structures
Document type:	Graduation Thesis – Higher professional studies
Scope and tools:	47 p., 5 tab., 10 graph., 6 fig.
Keywords:	Fire resistance, fire protection, types of fire protection, wooden pillar, plasterboard, rock wool, timber cladding, intumescent paint

Abstract:

In civil engineering wooden structures are in use from the very beginning of the science. Timber is one of the most suitable materials for building fire safe constructions. The problem is that, even though timber has a good behavior when exposed to fire, is still a combustible material. That is also the crucial property of timber. On one hand a timber component provides fuel stock for a fire, on the other hand, because of the type of burning, the outside layer of a timber member becomes char, which provides protection for the core of the exposed element. This char layer prevents oxygen to come in contact with combustible gases that are a product of timber exposed to high temperatures. To extend the time of resistance of a timber structure, different kinds of protection are used. These materials differ in efficiency and layout. I analyzed four basic kinds of fire protective materials, comparing them in regard of the resistance results. For the analysis I made a tool in Microsoft Excel to help me calculating resistance for a timber column with the use of different fire protective materials.

Ta stran je namenoma prazna.

ZAHVALA

Najprej se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Simonu Schnablu za pomoč pri izdelavi diplomske naloge in čas, ki mi ga je namenil.

Zahvaljujem se družini, ki mi je omogočila študij. Zahvala gre tudi noni, ki me je vedno v težkih trenutkih podpirala.

Nenazadnje gre zahvala fantu Juretu, ki je bil vedno prvi v vrsti za prevzemanje moje dobre in slabe volje. Hvala za pomoč, predvsem pa zaupanje vame.

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	17
1.1	Les kot gradbeni material.....	17
1.2	Požarna zaščita lesenih elementov.....	17
2	LESENI KONSTRUKCIJSKI ELEMENTI	19
2.1	Določanje projektne obtežbe	19
2.2	Leseni elementi pod požarno obremenitvijo	20
2.3	Požarna analiza	21
3	PASIVNA POŽARNA ZAŠČITA LESENIH ELEMENTOV.....	23
3.1	Mavčno kartonske plošče	25
3.2	Lesene obloge	26
3.3	Kamena volna.....	27
3.4	Intumescentne barve	28
4	IZRAČUN NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA.....	29
4.1	Rezultati izračuna nosilnosti lesenega stebra za izbrani primer	31
5	IZRAČUN NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA POD POŽARNO OBTEŽBO.....	32
5.1	Požarno nezaščiten prerez	32
5.1.1	Prikaz rezultatov računa nosilnosti za izbrani primer lesenega stebra brez uporabe zaščitnih sredstev	34
5.2	Požarno zaščiteni prerezi.....	35
5.2.1	Mavčno kartonske plošče	35
5.2.2	Lesene obloge.....	37
5.2.3	Kamena volna.....	38
5.2.4	Intumescentne barve	42
5.3	Primerjava učinkovitosti uporabe požarnih zaščit.....	43
6	ZAKLJUČEK.....	46
7	VIRI	47
	SEZNAM PRILOG	A

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 3.1: Osnovne fizikalne lastnosti mavčno kartonskih plošč.	25
Preglednica 3.2: Hitrosti oglenenja različnih lesenih oblog	27
Preglednica 3.3: Osnovne fizikalne lastnosti kamene volne TERVOL® DP – 8.....	28
Preglednica 4.1: Rezultati izračuna nosilnosti lesenega stebra 18/18/210 cm.....	31
Preglednica 5.1: Excelova preglednica za izračun Razreda požarne odpornosti lesenega stebra.	32
Preglednica 5.2: Klasifikacija obnašanja materialov ob izpostavljenosti ognju	43
Preglednica 5.3: Razredi požarne odpornosti in izračunani časi požarne odpornosti za izbrani leseni element požarno zaščiten z 15 mm debelimi oblogami.	44
Preglednica 5.4: Razredi požarne odpornosti in izračunani časi požarne odpornosti za izbrani leseni element požarno zaščiten z 30 mm debelimi oblogami	45

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Prikaz poteka temperature pri oglenenju lesenega elementa	21
Slika 2.2: Požarne krivulje po standardu Evrokod 1 (SIST EN 1991-1-2:2005)	22
Slika 3.1: Večanje globine oglenenja v odvisnosti od časa, ko velja $t_{ch} = t_f$ in $d_{char,n} < 25$ mm pri času t_a	24
Slika 3.2: Večanje globine oglenenja v odvisnosti od časa, ko velja $t_{ch} = t_f$ in $d_{char,n} \geq 25$ mm pri času t_a	24
Slika 3.3: Večanje globine oglenenja v odvisnosti od časa, ko velja $t_{ch} < t_f$ in $d_{char,n} \geq 25$ mm pri času t_a	25
Slika 3.4: Zaščita lesenega stebra z mavčno kartonskimi ploščami Knauf Fireboard.	26
Slika 3.5: Smrekova lesena požarna obloga	27
Slika 3.6: Prikaz reakcije intumescentne barve pri izpostavitvi visokim temperaturam	28
Slika 4.1: Tabela podatkov za izračun požarne odpornosti lesenega stebra.	29
Slika 5.1: Požarna odpornost obravnavanega lesenega stebra brez požarne zaščite.	34
Slika 5.2: Požarna odpornost obravnavanega lesenega stebra z in brez požarne zaščite. Požarna zaščita je iz ene in dveh plasti mavčno kartonskih plošč debeline 15 mm.....	35
Slika 5.3: Požarna odpornost obravnavanega lesenega stebra z in brez protipožarne zaščite. Požarna zaščita je iz ene in dveh plasti mavčno kartonskih plošč tipa DF debeline 15 mm..	36
Slika 5.4: Požarna odpornost obravnavanega lesenega stebra z in brez požarne zaščite. Požarna zaščita je iz smrekovih oblog debeline 15 in 30 mm.....	38
Slika 5.5: Potek izoterme po požarni zaščiti elementa s prikazano smerjo topl. toka.....	38
Slika 5.6: Požarna odpornost obravnavanega lesenega stebra z in brez protipožarne zaščite. Požarna zaščita je kamena volna debeline 30 mm.	41
Slika 5.7: Požarna odpornost obravnavanega lesenega stebra z in brez požarne zaščite. Požarne zaščite so debeline 15 mm.	43
Slika 5.8: Požarna odpornost obravnavanega lesenega stebra z in brez požarne zaščite. Požarne zaščite so debeline 30 mm.	44

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

Skozi zgodovino človeštva je bil les eden najbolj vestnih spremljevalcev človekovega napredka. Najprej so si praljudje z njim pomagali pri lovu, kasneje, po izumu ognja, so ga začeli uporabljati kot kurilni material, za kar ga uporabljamo še danes. Z razvojem se je začela uporaba lesa v konstruktivne namene, saj so najstarejše konstrukcije bile narejene iz kamna, ki je imel les v vlogi armature. Kasneje se je začel les uporabljati tudi kot glavni material pri gradnji, vendar se je njegova uporaba zmanjšala po tem, ko so ugotovili, da je za gradnjo najbolj uporabna kombinacija jekla in betona. Les je tako prišel na tretje mesto med gradbenimi materiali, na prvih dveh sta bila beton in jeklo.

Uporaba lesa se je v gradbeništvu ponovno razširila z montažno gradnjo. Les je v ta namen zelo dobrodošel material, saj omogoča hitro in preprosto gradnjo. Vse bolj se zavedamo, da je les izredno hvaležen material, ki poleg nosilne, opravlja tudi izolativno funkcijo, kar pomeni manj težav pri preprečevanju toplotnih mostov pri izvajanju spojev.

1.1 Les kot gradbeni material

Tudi pri gradnji z lesom so tako kot pri drugih materialih pozitivne in negativne plati. Če gledamo s perspektive gradbenika, je zagotovo dobra lastnost gradnje z lesom njegova lastna teža, ki ima za doseganje določene nosilnosti elementa manjšo lastno težo, kot jo imajo elementi iz armiranega betona ali jekla. Prav tako je les ob pravilni vgradnji trajen. Paziti je potrebno, da ni izmenično izpostavljen vlagi iz okolice, saj je v takih pogojih neobstojen. Če je vlaga v okolici elementa konstantna, je obstojen zelo dolgo. Primer take obstojnosti lahko vidimo v Benetkah, kjer je mesto v celoti zgrajeno na lesenih kolih v morju. Tudi prvi prebivalci v okolici Ljubljane, koliščarji, so gradili na ta način. Pomemben je tudi psihološki vpliv, ki ga ima les na ljudi, saj se v prostoru, kjer nas obdaja les, počutimo bolj ugodno kakor v prostoru z betonskim zidovjem.

Za gradbenike je pri gradnji z lesom lahko problem dimenzijska omejenost prereзов iz masivnega lesa. Ta problem je sicer rešljiv z izvajanjem lameliranih elementov, katerih dimenzije lahko prilagajamo potrebam. Pri uporabi masivnega lesa je največja še sprejemljiva dimenzija prereza 30 cm. Težave lahko predstavljajo tudi dejavniki tveganja, povezani z dejstvom, da je les organski material. Izpostavljen je škodljivcem in boleznim, katerim se lahko s primerno zaščito izognemo, ne moremo se pa izogniti anizotropnosti lesa, ki od izvajalcev zahteva dodatno pazljivost in dobro poznavanje mehanskih lastnosti lesa.

1.2 Požarna zaščita lesenih elementov

V pričujoči diplomski nalogi bom analizirala učinkovitost uporabe različnih požarnih zaščit za konstrukcijski element iz masivnega lesa. Izbrala sem štiri vrste požarne zaščite:

- mavčno kartonske plošče,
- lesene obloge,
- plošče iz kamene volne in
- intumescentne barve.

S pomočjo programa Microsoft Excel sem sestavila orodje za računanje požarne odpornosti lesenega stebra z uporabo različnih požarnih zaščit. Na podlagi pridobljenih rezultatov sem analizirala delovanje vsake zaščite posebej in jih med seboj primerjala.

2 LESENI KONSTRUKCIJSKI ELEMENTI

Preden pričnemo z analizo obnašanja lesenega stebra v primeru požara, moramo ugotoviti, kako se taki elementi obnašajo v normalnih pogojih.

2.1 Določanje projektne obtežbe

Za izračun nosilnosti lesenega stebra pod požarno obremenitvijo, je najprej potrebno opredeliti kako se steber obnaša v normalnih okoliščinah. Za to je potrebno ugotoviti, kakšnim obtežbam je tak element izpostavljen.

Obtežb katerim je element lahko izpostavljen v času njegove uporabe, je zelo veliko. Na podlagi tega se po standardih Evrokoda 1 (SIST EN 1991-1-1:2004, SIST EN 1991-1-3 in SIST EN 1991-1-4) deli obtežbe v naslednje kategorije:

- lastna teža – G ,
- koristne obtežbe – Q ,
- obtežba snega – Q_s ,
- obtežba vetra – Q_v in
- slučajne obtežbe – Q_1, Q_2, Q_3 , itd.

Pri tem je lastna teža konstrukcije same, koristne obtežbe so obtežbe oblog, pohištva, uporabnikov, torej vsega kar je povezano z opremo, potrebno za normalno uporabo konstrukcije. Obtežba snega je običajno bolj pomembna pri strešnih konstrukcijah in je njen vpliv različen od države do države, kajti količina snega je od regije do regije drugačna. V standardu so podatki za izračun obtežbe snega dodani kot nacionalni dodatek. To velja tudi za obtežbo vetra. Slučajne obtežbe so ostale obtežbe, ki jim je konstrukcija lahko izpostavljena v času uporabe.

Glede na vrsto obtežbe je potrebno upoštevati tudi ustrezne varnostne faktorje. Za lastno težo nosilne konstrukcije se upošteva varnostni faktor $\gamma_G = 1,35$, za ostale obtežbe pa faktor $\gamma_Q = 1,5$.

Za določitev najbolj neugodne situacije je potrebno določiti merodajno kombinacijo obtežb. Dejstvo je, da vse obtežbe, razen lastne teže, niso vedno prisotne na konstrukciji, zato je potrebno upoštevati dodatne redukcijske faktorje, s katerimi zmanjšamo vpliv obtežb, za katere je manjša verjetnost, da se pripetijo skupaj z merodajno večjo obtežbo. Za potrebe analize požarne odpornosti lesenega elementa je ta faktor $\psi_0 = 0,6$.

Obtežbe se razlikujejo tudi glede na trajanje njihovega vpliva. Delimo jih na

- stalne obtežbe – P ,
- dolgotrajne obtežbe (do 10 let) – L ,
- srednje dolgo trajajoče obtežbe (do 6 mesecev) – M in
- kratkotrajne obtežbe (do 1 tedna) – S .

Za vsako trajanje obtežb izračunamo, kakšno obremenitev predstavljajo in glede na razmerja med temi vrednostmi določimo, kakšen primer je merodajen. Potrebno pa je upoštevati, da

se obtežbe dopolnjujejo, daljše je potrebno vedno upoštevati s krajše trajajočimi, odvisno od tega, katere obtežbe računamo. Tako moramo v primeru računa za dolgotrajno obtežno kombinacijo, upoštevati tudi stalne obtežbe.

Za potrebe konkretnega primera upoštevamo, da sta merodajni lahko le srednje dolgo trajajoča in kratkotrajna kombinacija obtežb. Določitev merodajnega obtežnega primera je potrebna za določitev modifikacijskega faktorja k_{mod} . Vrednosti k_{mod} so podane v prilogi A. Izračunamo razmerje med modifikacijskima faktorjema za srednje dolgo trajajočo in kratkotrajno obtežbo

$$\frac{k_{mod,M}}{k_{mod,S}} = 0,889. \quad (1)$$

Če je razmerje med obtežno kombinacijo srednje dolgo trajajoče obtežbe in kombinacijo kratkotrajnih obtežb večje kakor vrednost izraza (1), je merodajna srednje dolgo trajajoča kombinacija, v nasprotnem primeru pa kratkotrajna kombinacija obtežb.

2.2 Leseni elementi pod požarno obremenitvijo

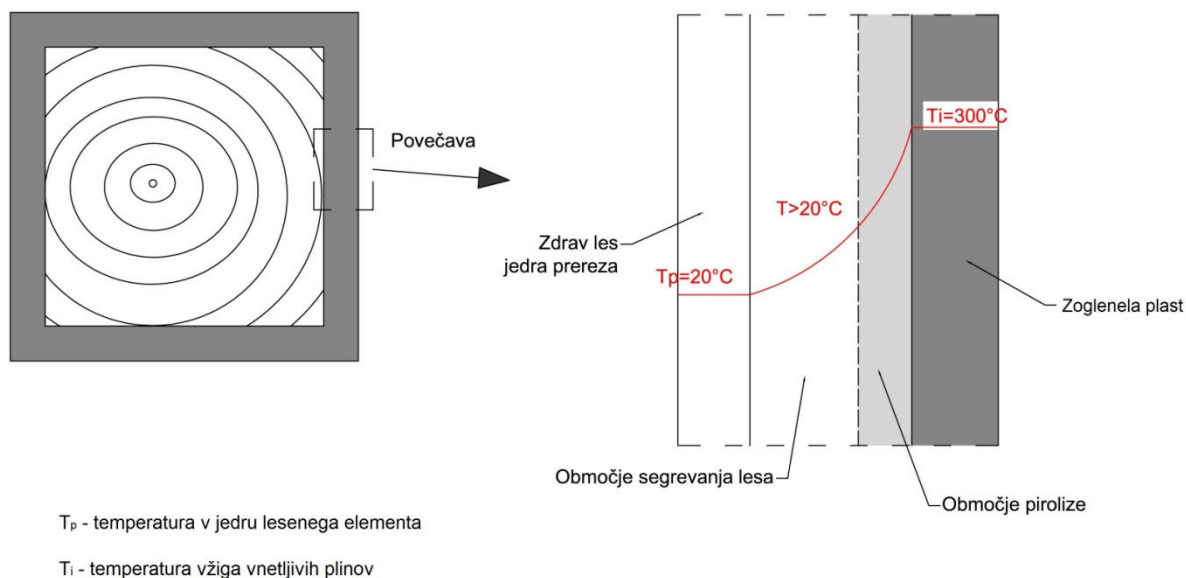
Les je izredno porozen material. V njem je konstantno prisoten delež vode. Zelo pomembna sta vsebnost vlage in temperature lesa ter okolice. Difuzija vlage in temperatura sta medsebojno povezani, saj toplota spodbudi oziroma povzroča difuzijo vode v lesu. Vsebnost vlage vpliva na mehanske lastnosti lesenega elementa, saj ima vlažen les nižji elastični modul. Zaradi prevelike količine vlage lahko pride tudi do nabrekanja in viskoznosti lesenih elementov. Za potrebe računa izberemo vlažnost za zračno suh konstrukcijski les, katere vrednost je $w_c = 10 - 20 \%$.

Les je gorljiv material, vendar je gorenje dejansko posledica vžiga plinov, ki se ob segrevanju lesa proizvajajo. Pri gorenju lesa nastaja zогlenela plast, ki ščiti jedro takega elementa pred nadaljnjim gorenjem, kar podaljša čas nosilnosti lesenega konstrukcijskega elementa. Temperatura, pri kateri se les spremeni v oglje, je po standardu Evrokod 5 (EN 1995-1-2:2004) $T_i = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Meja med zогlenelo plastjo in jedrom lesenega elementa, ki še ni bilo izpostavljeno visokim temperaturam, je plast, kjer poteka piroliza. Piroliza je nepovratna kemijska reakcija, pri kateri organska snov zaradi vpliva visoke temperature, brez prisotnosti kisika in vode, razpade na osnovne elemente. Pri lesu so ti elementi zelo vnetljivi plini in trden ostanek, zогlenela plast, katere osnovni element je ogljik. Ta plast predstavlja dodatno izolacijo jedra za čas, v katerem zогlenel les ne razpoka in odpade. Razporeditev plasti je prikazana na sliki 2.1.

Požarna obtežba je posledica izjemnega dogodka, ki se v življenjski dobi konstrukcije v večini primerov sploh ne zgodi. Vseeno moramo pri dimenzioniranju upoštevati nevarnost nastanka požara, kajti če se ta zgodi, ima ob neupoštevanju te možnosti katastrofalne posledice za nosilno konstrukcijo in uporabnike objekta.

O tem, koliko časa mora konstrukcija obdržati nosilnost v primeru požara, določa nacionalni dokument objavljen v Uradnem listu RS št. 31/2004: Priloga 2. V njem najdemo tudi kategorizacijo objektov glede na njihov namen in uporabo (Uradni list RS št. 31/2004: Priloga 1). Na podlagi te razporeditve se nato določa čas, za katerega mora konstrukcija obdržati ustrezno nosilnost v primeru požara in tako omogoči varno evakuacijo uporabnikov. Koliko

časa bo konstrukcija zdržala, zapišemo s črko R, ki pomeni nosilnost, in številko, ki pove, koliko minut bo konstrukcija zdržala. Na primer, če konstrukcija obdrži nosilnost v primeru požara še za eno uro, to zapišemo R60. Časi nosilnosti so lahko 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120 min, itd..



Slika 2.1: Prikaz poteka temperature pri ogledenju lesenega elementa

Konstrukcijo lahko zaščitimo z aktivnimi in pasivnimi ukrepi. Med aktivne ukrepe štejemo tiste, ki preprečujejo nastanek požara. To so senzorji za detekcijo prisotnosti dima, gasilni aparati, direktno javljanje gasilski enoti, lastna gasilska enota, itd.. Pri pasivnih ukrepih gre za omejevanje razširitve požara tako, da konstrukcija ohrani tri bistvene zahteve:

- R – odpornost/nosilnost,
- E – celovitost in
- I – izolativnost.

Požarne zaščite elementov spadajo v kategorijo pasivnih ukrepov, saj z njimi podaljšamo čas, ko konstrukcija zagotavlja ustrezne vrednosti zahtev R , E in I .

Za potrebe te diplomske naloge, bomo preverjali, koliko časa leseni steber brez in z uporabo pasivnih zaščitnih sredstev ohranja zahtevano nosilnost R .

2.3 Požarna analiza

Za določanje zahtevanega časa nosilnosti konstrukcije pod požarno obremenitvijo moramo vedeti, kakšnim temperaturam bo konstrukcija izpostavljena v primeru požara. Poslužujemo se požarne analize konstrukcije.

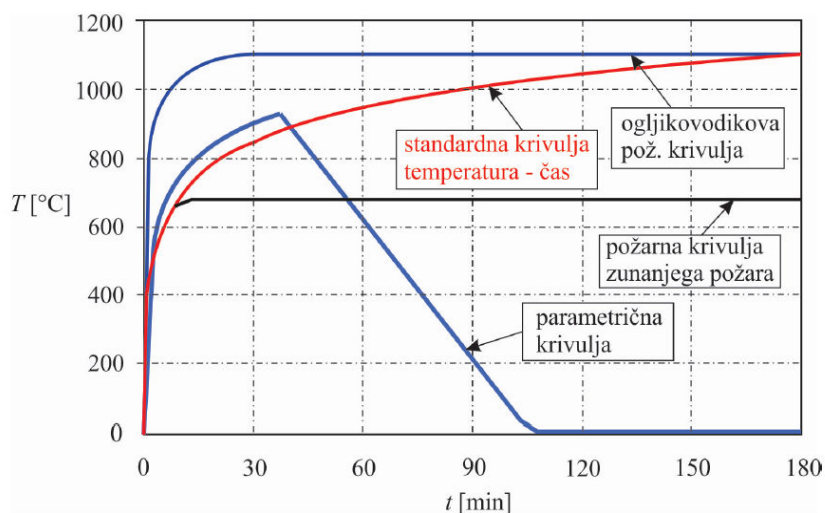
Prvi korak analize je določitev požarnega scenarija, v katerem raziščemo vse možnosti, kje se požar lahko začne, kako se razvija in na koncu pojenja. Količina energije, ki se bo sproščala v primeru požara, je odvisna od več faktorjev. Med pomembnejše spadajo vrsta in

količina gorljivega materiala, prisotnost kisika, možnost ventilacije, površina in razporeditev odprtin. Zaradi težke določljivosti takih parametrov se poslužujemo standardnih požarnih krivulj. V osnovi ločimo nominalne in modelirane požarne krivulje. Slednje temeljijo na specifičnih fizikalnih parametrih in predstavljajo poenostavljen model naravnega požara. Za potrebe analize odziva lesenega stebra je v Evrokodu 5 (EN 1995-1-2:2004), podana nominalna požarna krivulja.

Obstajajo tri osnovne nominalne krivulje. Standardna krivulja temperatura-čas upošteva obtežbo celuloznega tipa v primeru požara. To je model polno razvitega požara v omejenem požarnem sektorju. Temperaturo plinov v sektorju določimo z izrazom

$$T_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1), \quad (2)$$

kjer je t čas v minutah in T_g temperatura plinov v °C. Izraz (2) je povzet po standardu Evrokod 1 (SIST EN 1991-1-2:2005). Požarna krivulja zunanega požara se upošteva v primeru računa za zunanje ločilne elemente, ko lahko požar prihaja s strani zunanje fasade. Nazadnje je še ogljikovodikova krivulja v primeru nevarnosti gorenja ogljikovodikov. Vse krivulje so prikazane na sliki 2.2, kjer je z rdečo barvo označena standardna krivulja temperatura-čas, ki jo upoštevamo v računskem primeru v nadaljevanju. Na sliki 2.2 je prikazana temperatura T plinov v °C v odvisnosti od časa t v minutah. Vidimo, da je standardna krivulja temperatura-čas dober približek parametrični krivulji, ki je modelirana požarna krivulja. Kljub temu da pri standardni krivulji temperatura-čas požar ne pojenja, to pomeni, da smo pri računu na varni strani.



Slika 2.2: Požarne krivulje po standardu SIST EN 1991-1-2:2005

S pomočjo požarne krivulje lahko ugotovimo, kaj se s konstrukcijo dogaja pod požarno obremenitvijo. Vedeti moramo, kako se obnašajo materiali v konstrukciji, kako se toplota prevaja med in po materialu. Tako določimo temperaturno odvisno obnašanje vsakega elementa konstrukcije posebej, kar je drugi korak požarne analize. Nazadnje sledi združitev vseh ugotovitev v tretjem koraku, ko določimo mehanski odziv konstrukcije kot celote.

Ta del računa je v tej diplomski nalogi izpuščen, ker nas zanima predvsem, kako različne pasivne požarne zaščite lesenega stebra pripomorejo k podaljšanju časa njegove nosilnosti.

3 PASIVNA POŽARNA ZAŠČITA LESENIH ELEMENTOV

Leseni elementi se v primerjavi z jeklenimi in armiranobetonskimi izredno dobro obnašajo ob izpostavljenosti visokim temperaturam. Kljub temu stremimo k dodatnem podaljšanju nosilne sposobnosti lesenih elementov. Pomagamo si z različnimi protipožarnimi zaščitnimi sredstvi, ki obstajajo na tržišču. V nadaljevanju se bomo osredotočili le na nekaj izbranih, ki jih najdemo na slovenskem tržišču. To so v večji meri obloge. Dotaknili se bomo tudi naprednejše tehnologije, pri kateri se les zaščiti s posebnimi premazi.

Zaščitna sredstva vplivajo predvsem na čas vžiga lesenega elementa. Tako imamo tri pomembne čase pri gorenju zaščenega prereza. Najprej nas zanima čas, pri katerem se začne piroliza, torej prične nastajati zogljenela plast okoli izpostavljenega elementa. To je čas pričetka oglenenja, ki ga označimo s t_{ch} . Ta čas ne sovпада nujno s časom, ko odpove požarna zaščita. Ta čas imenujemo odpovedni čas požarne zaščite in ga označimo s t_f . Po tem, ko požarna zaščita odpove, prične pospešeno nastajati zogljenela plast. Hitrost oglenenja se po določenem času zmanjša na tako hitrost, kakršna je v primeru, ko ni uporabljeno nobeno zaščitno sredstvo. To je limitni čas, ki ga označujemo s t_a . Čas t_a je opredeljen kot čas, v katerem je debelina zoglele plasti večja od 25 mm. Ta se razlikuje glede na razmerje med časi t_{ch} in t_f . V primerih, ko velja $t_{ch} = t_f$, je limitni čas enak manjši izmed vrednosti izrazov,

$$t_a = 2t_f \quad (3)$$

in

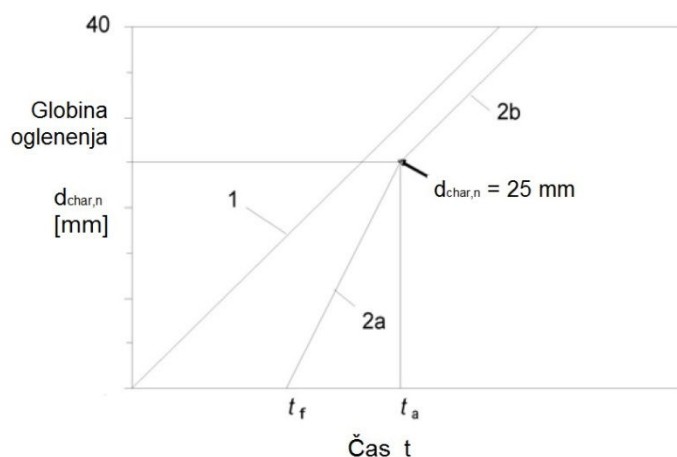
$$t_a = \frac{25}{k_3 \cdot \beta_n} + t_f, \quad (4)$$

kjer je β_n faktor hitrosti oglenenja lesa glede na standard Evrokod 5 (EN 1995-1-2:2004 Tabela 3.1) in k_3 je koeficient, s katerim pomnožimo faktor hitrosti oglenenja lesa za čas, ko odpove požarna zaščita in velja $t_f \leq t \leq t_a$. Za masiven les je hitrost oglenenja lesa $\beta_n = 0,08$ mm/min in faktor $k_3 = 3$. V primeru, ko je $t_{ch} < t_f$, je limitni čas določen z izrazom,

$$t_a = \frac{25 - (t_f - t_{ch}) \cdot k_2 \cdot \beta_n}{k_3 \cdot \beta_n} + t_f, \quad (5)$$

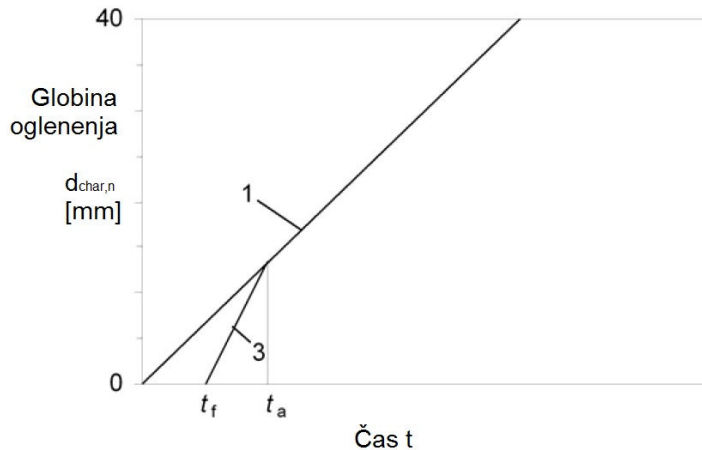
kjer imata β_n in k_3 enaki vrednosti kakor v enačbi (4). Faktor k_2 je odvisen od vrste uporabljene požarne zaščite. Prav tako se z vrsto zaščite spreminjata tudi časa t_{ch} in t_f .

Glede na razmerja med časi t_{ch} , t_f in t_a je, po standardu Evrokod 5 (EN 1995-1-2:2004), razvoj oglenenja možen na tri načine. Prvi način prikazan na sliki 3.1. Pri tem velja $t_{ch} = t_f$ in globina zoglele plasti je pri času t_a vsaj 25 mm. Črta označena z 1 prikazuje, kako se globina oglenenja povečuje s časom pri nezaščitenem lesenem prerezu, črta 2 pa pri požarno zaščitenem. V delu 2a je razvidno, da se takoj po odpovedi zaščite prične pospešeno oglenenje do globine zoglele plasti $d_{char,n} = 25$ mm, po tem se oglenenje nadaljuje z enako hitrostjo kakor pri nezaščitenem prerezu, kar prikazuje del 2b, ki je vzporeden s črto 1.



Slika 3.2: Večanje globine oglenenja v odvisnosti od časa, ko velja $t_{ch} = t_f$ in $d_{char,n} \geq 25 \text{ mm}$ pri času t_a .

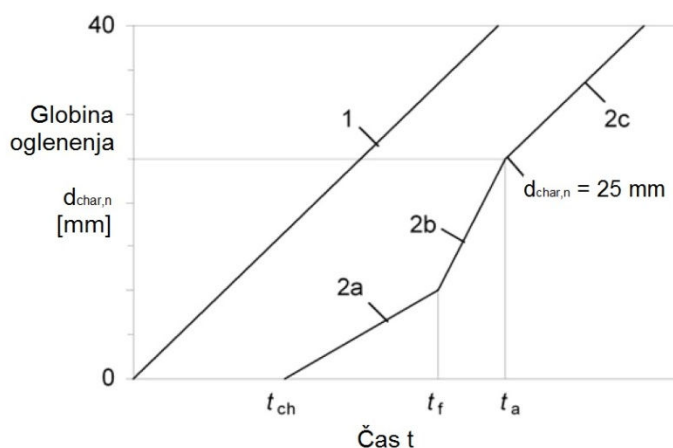
Slika 3.2 prikazuje drugi način oglenenja, za katerega prav tako velja $t_{ch} = t_f$. Razlika glede na prvi način je v tem, da je v času t_a globina zoglele plasti manjša kakor 25 mm. V takem primeru pride do situacije, ko je čas zakasnitve pričetka pirolize lesenega elementa prisoten le v prvem stadiju požara. Po odpovedi požarne zaščite začne pospešeno oglenenje lesa, kakor je razvidno iz črte 3. Črta 1 in 3 se združita v točki, kjer je globina zoglele plasti pri pospešenem oglenenju enaka tisti pri normalni hitrosti oglenenja po enakem času. Leseni element po času t_a ogleni s hitrostjo, kakor da bi ne bil zaščiten.



Slika 3.1: Večanje globine oglenenja v odvisnosti od časa, ko velja $t_{ch} = t_f$ in $d_{char,n} < 25 \text{ mm}$ pri času t_a .

Nazadnje je tukaj še tretji primer, pri katerem velja $t_{ch} < t_f$ in je globina zoglele plasti pri času t_a enaka 25 mm. Potek oglenenja v odvisnosti od časa je prikazan s črto 2 na sliki 3.3. V času, ko se začne oglenenje lesenega elementa, in velja $t_{ch} < t < t_f$, je hitrost oglenenja manjša kakor pri nezaščitenem prerezu, kar prikazuje del 2a. Oglenenje je bolj počasno, ker je temperatura na površini lesenega elementa nižja kakor v okolici. Na to vpliva požarna zaščita, kljub temu da les že ogleni. Po tem, ko odpove požarna zaščita elementa, se začne pospešeno oglenenje lesa, kakor prikazuje del 2b, do časa t_a , ko je globina oglenenja 25 mm. Oglenenje je pospešeno, ker je v trenutku odpovedi požarne zaščite lesen element izpostavljen višjim temperaturam, kakor enako zoglenel nezaščiteni leseni element. Oglenenje se upočasni, ko zoglenela plast meri 25 mm in je to enako kakor pri nezaščitenem

prerezu. Od tega trenutka dalje del 2c kaže, da se oglenenje nadaljuje z enako hitrostjo kakor pri nezaščitenem prerezu.



Slika 3.3: Večanje globine oglenjenja v odvisnosti od časa, ko velja $t_{ch} < t_f$ in $d_{char,n} \geq 25$ mm pri času t_a .

V nadaljevanju poglavja bom predstavila nekaj vrst požarne zaščite lesenih elementov.

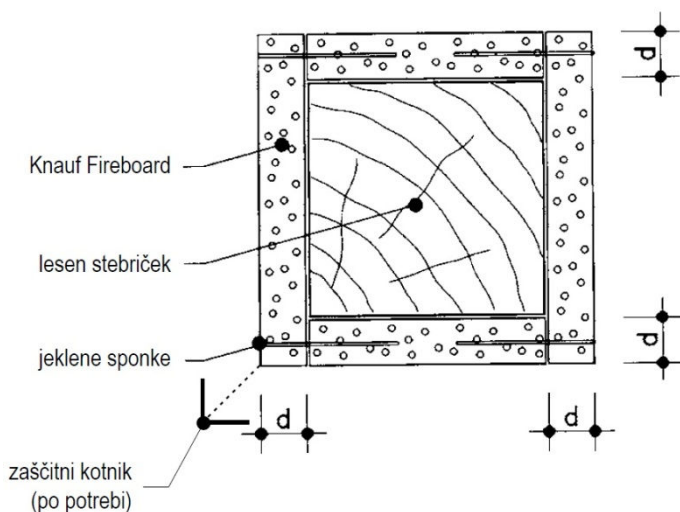
3.1 Mavčno kartonske plošče

Ena najpogostejših oblik požarne zaščite so mavčno kartonske plošče. Podjetje Knauf Ljubljana d.o.o. je eno vodilnih podjetij v Sloveniji, ki nudi storitve zaščite konstrukcij z mavčno kartonskimi ploščami in drugimi vrstami plošč. Pri drugih ploščah so osnovni mavčno kartonski ali mavčni plošči dodana vlakna, ki zagotavljajo boljše mehanske in termične lastnosti plošč.

Račun naredimo za klasične mavčno kartonske plošče in mavčno kartonske plošče tipa DF, ki imajo povišano požarno odpornost zaradi dodanih steklenih vlaken. Obe vrsti mavčno kartonskih plošč sta namenjeni tudi za uporabo v prostorih s povišano vlažnostjo. V preglednici 3.1 so podane osnovne fizikalne lastnosti mavčno kartonskih plošč tipa DF. Za standardne mavčno kartonske plošče imamo podatke potrebne za izračun v standardu Evrokod 5.

Preglednica 3.1: Osnovne fizikalne lastnosti mavčno kartonskih plošč.

Dimenzije	Debelina [mm]	12,5	15,0	18,0
	Širina [m]	1,25		
	Dolžina [m]	2,0-2,5-2,6-2,75-3,0	2,0-2,5-2,75	2,6
Volumenska gostota (ρ)	[kg/m ³]	860	860	860
Enakomerna vlažnost (w)	[%]	1,0		
Toplotna prevodnost (λ)	[W/mK]	0,21		
Upogibna trdnost v vzdolžni smeri plošče ($\sigma_{ }$)	[MPa]	7,20	6,0	5,0
Upogibna trdnost v prečni smeri plošče (σ_{\perp})	[MPa]	2,10	1,80	1,50
Modul elastičnosti v vzdolžni smeri plošče ($E_{ }$)	[MPa]	2800		
Modul elastičnosti v prečni smeri plošče (E_{\perp})	[MPa]	2500		



Slika 3.4: Zaščita lesenega stebra z mavčno kartonskimi ploščami Knauf Fireboard.

Na sliki 2.1 je prikazano, kako izgleda steber, zaščiten s Knauf ploščami. Na sliki so plošče Fireboard, ki imajo dodana vlakna za boljšo mehansko in požarno odpornost.

Po standardu Evrokod 5 (EN 1995-1-2:2004) pri računu za mavčno kartonske plošče tipov A in H velja, da je $t_{ch} = t_f$. Za plošče tipa E, D, R in I velja, da imajo boljše termične in mehanske lastnosti kakor plošče tipa A in H, kar pomeni, da smo pri računu na varni strani. Čas pričetka nastajanja zoglenele plasti je podan z izrazom

$$t_{ch} = 2,8 * h_p - 14, \quad (6)$$

pri čemer je h_p debelina mavčno kartonske plošče. V primeru, ko imamo 2 plasti plošč, se h_p izrazi kakor vsota debeline zunanje plasti in 50 % debeline notranje plasti za plošče tipa A in H.

Pri ploščah tipa DF velja, da je $t_{ch} < t_f$. Čas pričetka oglenenja lesa se tako izračuna z izrazom (6), čas odpovedi požarne zaščite ni podan. Izračunamo ga na podlagi toplotne prevodnosti takih mavčno kartonskih plošč. Predpostavimo, da se smatra za odpoved požarne zaščite, ko je temperatura na obodu lesenega elementa enaka temperaturi na površini požarne zaščite ali ko temperatura v okolici elementa doseže temperaturo 1000 °C. Če pogledamo sliko 5.1, je to, ko velja $T_i = T_a$ ali $T_g = 1000$ °C. Tako dobimo čas t_f . Postopek izračuna temelji na enakih predpostavkah, kakor to velja za požarno zaščito iz kamene volne, zato je postopek enak. Opisan je v poglavju 4.2.3. Izjema je primer, ko je pred časom t_f dosežena globina oglenenja 25 mm, to je čas t_a . Od tega trenutka dalje, se oglenenje nadaljuje, kakor pri nezaščitenem prerezu. Kljub temu, da še ni prišlo do odpovedi požarne zaščite, se računsko upošteva, kot da je odpovedala, ker nima več vpliva na hitrost oglenenja lesenega elementa. To računsko upoštevanje z enakostjo $t_f = t_a$.

V primeru, da imamo 2 plasti mavčno kartonskih plošč tipa DF, je dimenzija h_p enaka vsoti debeline zunanje plasti in 80 % notranje plasti.

3.2 Lesene obloge

Zaradi izredno dobrih lastnosti lesa, ob izpostavljenosti ognju, le-tega lahko uporabimo tudi kot zaščito za lesen steber iz masivnega konstrukcijskega lesa. Gleda na vrsto lesa se spreminja tudi njegova hitrost oglenenja. V standardu Evrokod 5 (EN 1995-1-2:2004) so hitrosti oglenenja za različne vrste lesa podane z vrednostmi, podanimi v preglednici 3.2.

Preglednica 3.2: Hitrosti oglenenja različnih lesenih oblog

Vrsta lesa	Hitrost oglenenja (β_o [mm/min])
hrast	0,5
smreka	0,65
iverne plošče	0,8
plošče iz lesenih vlaken	2,0

Iz preglednice je jasno razvidno, da sta najbolj učinkoviti zaščiti s hrastovimi in smrekovimi lesenimi oblogami. Bi pa bila skrajno neučinkovita zaščita s ploščami iz lesenih vlaken, ki praktično ne predstavljajo nikakršne požarne zaščite.

Kakor pri navadnih mavčno kartonskih ploščah tudi tukaj velja enakost $t_{ch} = t_f$. Čas pričetka nastajanja zoglene plasti je podan z izrazom

$$t_{ch} = \frac{h_p}{\beta_o}, \quad (7)$$

kjer je h_p debelina lesene obloge in β_o hitrost oglenenja glede na vrsto lesa lesene obloge, kakor je določeno v preglednici 3.2.

Za računski primer lesenih oblog izberemo smrekove lesene protipožarne obloge družbe Zeleni zajec, naravni materiali, d.o.o.. Podatke o lastnostih obloge pridobimo iz Maloprodajnega cenika LES 2013:2013 (str. 9). Vlažnost lesa takih oblog je 13 % z možnostjo odstopanja za +/- 2 %. Dimenzije prereza obloge so 40x146 mm, pri čemer je prekrivna mera 131 mm. Možno je dobiti dolžine oblog 3, 4 in 5 m. Na sliki 3.5 je prikazano kako izgleda takšna lesena protipožarna plošča.



Slika 3.5: Smrekova lesena požarna obloga

3.3 Kamena volna

Kamena volna je material, ki ima širok spekter uporabe na zelo različnih področjih: industrija, gradbeništvo, energetika, ladjedelništvo in kmetijstvo. Diabaz in dolomit sta osnovni kamenini, ki ju s taljenjem in razvlaknjevanjem pretvorijo v osnovna vlakna kamene volne.

Eno izmed podjetij, ki se ukvarja z izdelovanjem in prodajanjem izdelkov iz kamene volne, je Astra NOVA d.o.o.. Njihovi izdelki se prodajajo pod znamko Tervol®. Taki izdelki imajo izredno dobre požarne lastnosti, saj je tališče kamene volne višje kakor 1000 °C. Na lastnosti volne vpliva predvsem njena gostota, kar je zajeto tudi v standardu Evrokod 5 (EC 1995-1-2;2004), ko se čas pričetka oglenenja lesa pri zaščiti s kameno volno računa s sledečim izrazom

$$t_{ch} = 0,07 * (h_{ins} - 20) * \sqrt{\rho_{ins}}, \quad (8)$$

kjer je ρ_{ins} gostota kamene volne, h_{ins} pa debelina plasti kamene volne v milimetrih. V tem primeru velja $t_{ch} < t_f$.

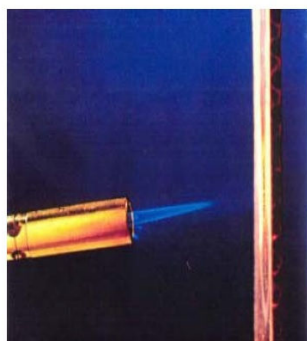
Gostote, ki jih lahko dosežemo pri kameni volni, so od 30 do 180 kg/m³. Za potrebe diplomske naloge sem izbrala kameno volno TERVOL® DP – 8. To so plošče kamene volne, ki se uporabljajo kot toplotna in akustična izolacija. Take plošče niso odporne na tlačne obremenitve. Glede na to, da imamo primer stebra, bodo plošče le pritrjene na steber in ne bodo imele funkcije tlačno obremenjenega elementa. V preglednici 3.3 so napisane osnovne fizikalne lastnosti takih plošč. Postopek izračuna odpovednega časa t_f za plošče iz kamene volne je opisan v poglavju 5.2.3.

Preglednica 3.3: Osnovne fizikalne lastnosti kamene volne TERVOL® DP – 8.

Debelina	[mm]	30-40-50-60-80-100-120-140
Širina	[m]	0,5
Dolžina	[m]	1,0
Toplotna prevodnost (λ)	[W/mK]	0,040
Tališče	[°C]	1000 <
Gostota (ρ)	[kg/m ³]	40
Specifična toplota (c)	[J/kgK]	840

3.4 Intumescentne barve

Poleg barv, ki les ščitijo pred škodljivci in vlago, poznamo tudi intumescentne barve. Značilnost takih barv je, da ob stiku s temperaturami nad 200 °C v trenutku nabreknejo. Tako se ustvari plast ogljikove pene, ki ščiti leseni element pred visokimi temperaturami. Praktično



Slika 3.6: Prikaz reakcije intumescentne barve pri izpostavitvi visokim temperaturam



to izgleda tako, kakor je vidno na sliki 3.6. Premaz, ki je pri normalni temperaturi debel le 0,1 mm, svoj volumen poveča do 200-krat.

S tem, ko premaz nabrekne, preprečuje nastanek vnetljivih plinov, ki bi pomenili vžig lesenega elementa. Poleg izredno učinkovite požarne zaščite je po aktivaciji lahko odstranljiv. Obnova zaščite je

zelo lahka, saj se premaz po očiščenju površine, enostavno ponovno nanese.

Zaščita s takimi barvami lahko podaljša nosilnost lesene konstrukcije do ene ure. Težavo lahko predstavljajo nizke temperature. Izrednega pomena je, da premaz ne zmrzne. Najnižja temperatura, pri kateri še ohrani svoje lastnosti je 5 °C. Zaradi toplotne omejenosti so taki premazi primerni le za notranjo uporabo.

Na trgu je prisotnih veliko takih premazov, ki poleg požarne zaščite predstavljajo finalno obdelavo lesene površine. Lahko so prozorni, barvni, s sijajem ali brez. Ti premazi spadajo v kategorijo B glede na odziv na požar, kar pomeni, da material zelo malo prispeva k razvoju požara (glej poglavje 5.2.4.)

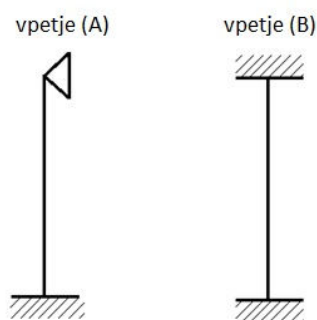
4 IZRAČUN NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA

Osnova za primerjanje požarne odpornosti z uporabo različnih zaščitnih sredstev je veljavni pravilnik za projektiranje lesenih konstrukcij standard Evrokod 5 (SIST EN 1995-1-1:2005). Na osnovi tega standarda v programu Microsoft Excel naredimo program, ki na podlagi vnesenih podatkov o dimenzijah lesenega stebra, vrsti uporabljenega lesa in obtežbah, ki jim je stebel izpostavljen, določi potrebno nosilnost stebra.

Program izgleda tako, da nas najprej povpraša po vseh podatkih za izračun lastnosti lesenega stebra, kakor je prikazano na sliki 4.1. Vnesti je potrebno zahtevane podatke. Običajno sta širina in višina prereza enaki. Vse te podatke moramo podati v centimetrih. Podatki na sliki 4.1 so podatki za izbrani konkretni računski primer. Izbrati moramo tudi način podpiranja stebra. Če gre za stebel v eni izmed etaž, je vpetje polno, če je ta pod streho, pa imamo opravka z vrtljivo podporo. To je pomembno za izračun uklonske dolžine l_u , ki nam služi za ugotavljanje nevarnosti uklona stebra.

Lastnosti lesenega stebra

višina prereza stebra (h)	18	cm
širina prereza stebra (b)	18	cm
dolžina stebra (l)	210	cm
vrsta vpetja	vpetje (a)	<input type="button" value="▼"/>
vrsta lesa	C24	<input type="button" value="▼"/>



Obtežba

stalna obtežba (G)	50	kN
koristna obtežba (Q)	65	kN
ostale obtežbe (Q1)	30	kN
ostale obtežbe (Q2)		kN
ostale obtežbe (Q3)		kN

Izberi zaščito:

Slika 4.1: Tabela podatkov potrebnih za izračun požarne odpornosti lesenega stebra.

Uklonska dolžina stebra, ki je zgoraj in spodaj polno vpet, izračunamo po izrazu

$$l_u = 0.5 * l, \quad (9)$$

uklonsko dolžino stebra, ki je zgoraj vrtljivo in spodaj polno vpet, pa izračunamo po izrazu

$$l_u = 0.7 * l. \quad (10)$$

S pomočjo preglednice standarda Evrokod 5 (SIST EN 1995-1-1:2005), ki je v prilogi A, izberemo vrsto lesa.. Na podlagi tega program izbere podatke o karakteristični trdnosti lesa.

Potrebujemo podatek o tlačni karakteristični trdnosti vzporedno z vlakni $f_{c,0,k}$. Po izbiri vrste lesa program določi modul elastičnosti $E_{0,mean}$ in strižni modul G_{mean} .

Po tem, ko izpolnimo tabelo o lastnostih izbranega lesenega stebra, moramo izpolniti tabelo obtežb na steber v normalnih temperaturnih pogojih, če je torej temperatura okolja 20 °C. Na podlagi vpisanih obtežb v ustrezna okenca na sliki 4.1, program izračuna, katera obtežna kombinacija je najbolj kritična in za naš račun merodajna. Za potrebe računa za izbrani leseni steber izberemo le tri vrste obtežb na element.

Nazadnje je potrebno izbrati še vrsto zaščite. Glede na to nas program povpraša po podatkih, potrebnih za izračun odpornosti lesenega elementa.

Na podlagi vpisanih podatkov dobimo projektne vrednosti karakterističnih tlačnih trdnosti vzporedno z vlakni $f_{c,0,d}$ z izrazom

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} * k_{mod}, \quad (11)$$

kjer je k_{mod} določen glede na merodajno obtežbo in je podan v standardu Evrokod 5 (SIST EN 1995-1-1:2005) v tabeli 3.1. Določa se glede na vrsto lesa, ki je v našem primeru masiven, in trajanje merodajne obtežbe. Varnostni faktor γ_m je odvisen od vrste lesa. Pri nas gre za masiven les, pri čemer je $\gamma_m=1,30$.

Glede na pridobljene podatke se nato izvede kontrola tlačnih napetosti prereza. Pri tem preverimo, ali prerez prenese obtežbo. Program določi projektno napetost za merodajen obtežni primer na prerez z izrazom

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A}, \quad (12)$$

pri čemer je N_d sila v stebru, ki jo povzroča merodajna obtežba in A ploščina prereza stebra. V izbranem primeru bomo upoštevali, da imamo steber, ki ni bočno podprt in je izpostavljen le tlačnim silam zaradi obtežbe. Vseeno morata biti izpolnjena kriterija, da sta relativni vitkosti okoli osi x in y dovolj majhni, $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$ in $\lambda_{rel,z} \leq 0,3$, kar pomeni, da ni potrebno upoštevati vpliva uklona. Za kvadratni prerez velja $\lambda_{rel,y} = \lambda_{rel,z}$. Relativna vitkost se izračuna glede na izraz

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}, \quad (13)$$

pri čemer je $E_{0,05}$ 5 % fraktila vrednosti elastičnega modula $E_{0,mean}$ in vitkost λ je enaka za x in y smer

$$\lambda = \frac{l_u}{i}, \quad (14)$$

kjer je i vztrajnostni polmer

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}, \quad (15)$$

kjer je I vztrajnostni moment prečnega prereza stebra, ki se v primeru kvadratnega prečnega prereza izračuna po izrazu

$$I = \frac{h^4}{12}. \quad (16)$$

Če je kriterij relativne vitkosti izpolnjen, to je $\lambda_{rel} \leq 0,3$, potem je zadoščeno tudi pogoju, da je projektna napetost $\sigma_{c,0,d}$ (12) manjša ali enaka projektni napetosti $f_{c,0,d}$ (11). V primeru, ko ta kriterij ni izpolnjen, moramo upoštevati še uklon zaradi tlaka. Tega upoštevamo s korekcijskima faktorjema $k_{c,y}$ in $k_{c,z}$, ki sta odvisna od geometrije prereza in v primeru kvadratnega prereza enaka. Označimo ju s k_c . Korekcijski faktor izračunamo po izrazu

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}}, \quad (17)$$

kjer je λ_{rel} izračunana po enačbi (13) in k , ki je enak za y in z smer, izračunan po izrazu

$$k = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2), \quad (18)$$

pri čemer je pomožni faktor $\beta_c = 0,2$ za masiven les.

Nosilnost obravnavanega lesenega stebra pri normalnih pogojih določimo z izrazom

$$R_d = f_{c,0,d} * A, \quad (19)$$

kjer je $f_{c,0,d}$ določen z izrazom (11) in A ploščina prereza stebra. Za normalne pogoje se šteje, da je temperatura okolice 20 °C, vlažnost okoliškega zraka od 45 do 85 % in vlažnost lesa manjša od 20 %, kar je značilno za konstrukcijski les. Po standardu Evrokod 5 (SIST EN 1995-1-1:2005) tak les spada v 2. uporabnostni razred.

4.1 Rezultati izračuna nosilnosti lesenega stebra za izbrani primer

Preglednica 4.1: Rezultati izračuna nosilnosti lesenega stebra 18/18/210 cm.

$A =$	324	cm ²
$I_u =$	105	cm
$f_{c,0,d} =$	1,454	kN/cm ²
$N_d =$	192	kN
$\sigma_{c,0,d} =$	0,59	kN/cm ²
$\lambda_{rel} =$	0,34	
$\lambda =$	20,21	
$i =$	5,2	cm
$I =$	8748	cm ⁴
$k =$	0,563	
$k_c =$	0,99	
$R_d =$	471,05	kN

5 IZRAČUN NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA POD POŽARNO OBTEŽBO

5.1 Požarno nezaščiten prerez

Preden pričnemo z računom požarne odpornosti zaščitenih prereзов, moramo izračunati, kako se obnaša konstrukcija v primeru požara brez nikakršne pasivne zaščite. To naredimo na podlagi merodajnega obtežnega primera iz prvega dela računa lastnosti lesenega stebra pri normalnih temperaturnih pogojih, kot je opisano v poglavju 2.1. V nadaljevanju bomo uporabili metodo reduciranega prereza, ki je predlagana v standardu Evrokod 5 (EC 1995-1-2:2004).

Najprej moramo določiti zahtevano nosilnost stebra v primeru požara $N_{fi,s,d}$ z izrazom

$$N_{fi,s,d} = N_{s,d} * \eta_{fi}, \quad (20)$$

kjer je $N_{s,d}$ sila v stebru zaradi merodajnega obtežnega primera pri normalnih pogojih in η_{fi} je faktor zmanjšanja nosilnosti elementa zaradi izpostavljenosti požaru. Za potrebe računa smo izbrali poenostavljeno vrednost faktorja $\eta_{fi} = 0,6$, razen v primeru, da računamo za lesene stebre v skladiščih in na dohodnih poteh, ko je $\eta_{fi} = 0,7$.

Standard Evrokod 5 (EN 1995-1-2:2004) podaja nominalne projektne hitrosti oglenenja lesa. Za masiven les s karakteristično gostoto večjo od 290 kg/m^3 je le ta $\beta_n = 0,8 \text{ mm/min}$. Nominalna vrednost hitrosti oglenenja upošteva vpliv robov in nepravilnosti v strukturi lesa.

Na podlagi opisanega izračuna v poglavju 3, se v programu Microsoft Excel izpiše tabela s stolpci kakor je prikazano v Preglednici 5.1. Za izbran konkreten primer so tabele izračunov podane v prilogi B.

Preglednica 5.1: Excelova preglednica za izračun razreda požarne odpornosti lesenega stebra.

t [min]	$d_{char,n}$ [cm]	k_0	$k_0 * d_0$ [cm]	d_{ef} [cm]	b_{ef} [cm]	h_{ef} [cm]	$A_{f,t}$ [cm ²]	$R_{fi,t,d}$ [kN]	Doseganje nosilnosti	Razred požarne odpornosti
0	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	R45
5	0,4	0,25	0,18	0,6	16,9	16,9	283,9	515,97	OK	
10	0,8	0,50	0,35	1,2	15,7	15,7	246,5	447,95	OK	
15	1,2	0,75	0,53	1,7	14,6	14,6	211,7	384,73	OK	
20	1,6	1,00	0,70	2,3	13,4	13,4	179,6	326,32	OK	
25	2,0	1,00	0,70	2,7	12,6	12,6	158,8	288,52	OK	
30	2,4	1,00	0,70	3,1	11,8	11,8	139,2	253,04	OK	
35	2,8	1,00	0,70	3,5	11,0	11,0	121,0	219,89	OK	
40	3,2	1,00	0,70	3,9	10,2	10,2	104,0	189,07	OK	
45	3,6	1,00	0,70	4,3	9,4	9,4	88,4	160,58	OK	
50	4,0	1,00	0,70	4,7	8,6	8,6	74,0	134,41	OK	
55	4,4	1,00	0,70	5,1	7,8	7,8	60,8	110,57	NI OK	
60	4,8	1,00	0,70	5,5	7,0	7,0	49,0	89,05	NI OK	
65	5,2	1,00	0,70	5,9	6,2	6,2	38,4	69,86	NI OK	

V prvem stolpcu se nam izpisuje čas t v minutah od začetka požara s korakom 5 min do 120 min, nato se korak poveča na 20 min do 380 min. Največji čas odpornosti je po »Uradni list RS št. 31/2004: Priloga 2« lahko 360 min, zato ne računam primerov za večje čase kakor 380 min. Drugi stolpec izpisuje, kakšna je globina oglenenja $d_{char,n}$ glede na čas, kar opisuje izraz

$$d_{char,n} = \beta_n * t. \quad (21)$$

V tretjem stolpcu je izpisan k_0 , katerega vrednost je odvisna od časa. Če je $t \leq 20$ min, je določen z izrazom

$$k_0 = \frac{t}{20}, \quad (22)$$

medtem ko je $t > 20$ min velja, da je $k_0 = 1$. V naslednjem stolpcu se izpisuje zmnožek

$$k_0 * d_0, \quad (23)$$

kjer se vrednosti k_0 s časom t spreminjajo in d_0 predstavlja globino zoglenele plasti, za katero predpostavljamo, da nima več nikakršne nosilnosti in je enaka 0,7 cm. Ta zmnožek nam določa, za koliko moramo zmanjšati osnovni prerez, da dobimo del prereza, ki ima še začetno nosilnost. S pomočjo tega podatka lahko izračunamo efektivno globino oglenenja z izrazom

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 * d_0, \quad (24)$$

kar je vsebina petega stolpca. S pomočjo efektivne globine oglenenja potem izračunamo zmanjšane dimenzije prečnega prereza lesenega stebra. Vrednosti za efektivno širino b_{ef} , efektivno višino h_{ef} in efektivno ploščino prereza $A_{ef,t}$ določimo z izrazi

$$b_{ef} = b - 2 * d_{ef}, \quad (25)$$

$$h_{ef} = h - 2 * d_{ef}, \quad (26)$$

$$A_{ef,t} = b_{ef} * h_{ef}, \quad (27)$$

kjer sta b in h osnovna višina in širina prereza lesenega stebra. Odpornosti reduciranega prereza $R_{fi,t,d}$, se izračuna po izrazu

$$R_{fi,t,d} = f_{fi,c,o,d} * A_{ef,t}, \quad (28)$$

kjer je $A_{ef,t}$ izračunan z izrazom (27) in $f_{fi,c,o,d}$ je projektna tlačna trdnost lesa v primeru požara določena po izrazu

$$f_{fi,c,o,d} = \frac{f_{c,0,20}}{\gamma_{m,fi}} * k_{mod,fi}, \quad (29)$$

kjer je $\gamma_{m,fi}$ varnostni faktor za les v primeru požara, katerega vrednost je $\gamma_{m,fi} = 1$, $k_{mod,fi}$ je modifacijski faktor za primer požara in je za metodo redukcije dimenzij prereza enak $k_{mod,fi} = 1$. Imamo še 20 % fraktilo vrednosti projektne tlačne trdnosti označene z $f_{c,0,20}$, ki izračunamo po izrazu

$$f_{c,0,20} = k_{fi} * f_{c,0,k}, \quad (30)$$

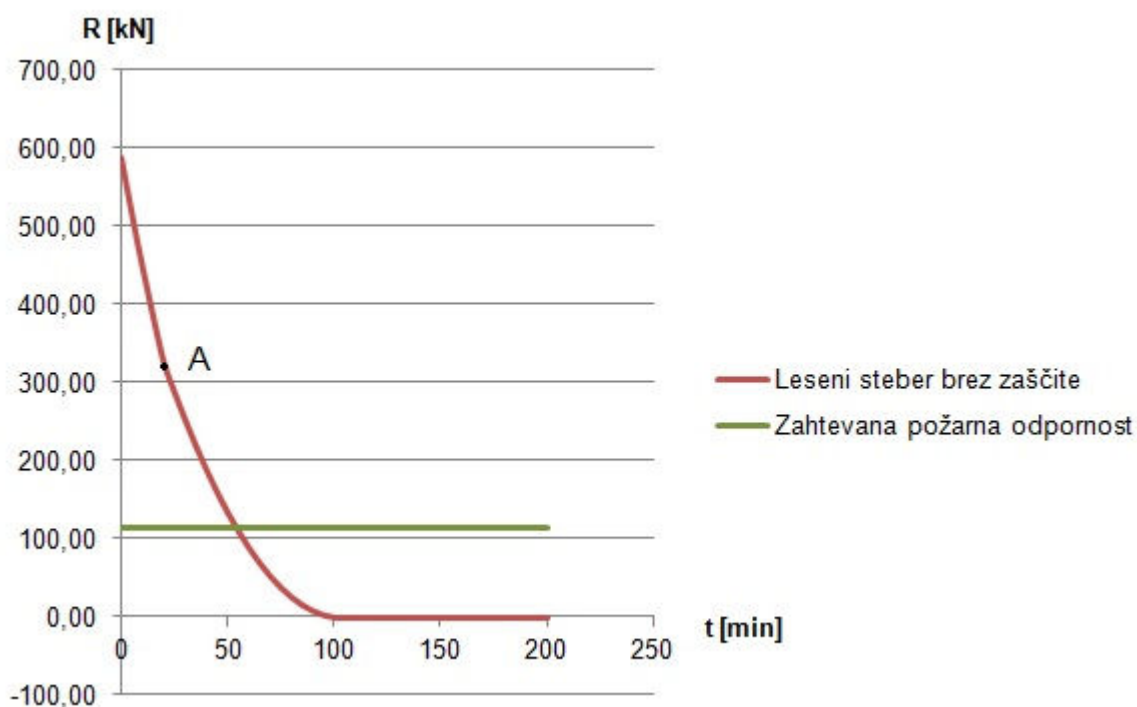
v katerem nastopa karakteristična tlačna trdnost lesa $f_{c,0,k}$, ki jo program določi na podlagi vrste uporabljenega lesa, kakor je opisano v poglavju 4. Faktor k_{fi} je podan v Preglednici 2.1 v Evrokodu 5 (EN 1995-1-2:2004) in je za masiven les enak $k_{fi} = 1,25$.

V stolpcu »Doseganje nosilnosti« program preverja, ali je dosežena zahtevana nosilnost $N_{fi,s,d}$ izračunana z izrazom (20). V primeru, da je nosilnost dosežena, se v stolpcu izpiše

»OK«, v nasprotnem pa »NI OK«. Na podlagi te ugotovitve se v zadnjem stolpcu »Razred požarne odpornosti« izpiše dosežena odpornost prereza z oznako Rx, kjer neznanka x predstavlja čas v minutah, pove torej, koliko časa bo konstrukcija obdržala nosilnost glede na Uradni list RS št. 31/2004: Priloga 2.

5.1.1 Prikaz rezultatov računa požarne odpornosti za izbrani primer lesenega stebra brez uporabe zaščitnih sredstev

Rezultate izračuna najlažje prikažemo s sliko, kjer je prikazano, kako se nosilnost izbranega lesenega stebra, ki je izpostavljen požaru, s časom zmanjšuje. To odvisnost izraža slika 5.1. Funkcija zelene barve označuje zahtevano nosilnost prereza, ki je za izbrani primer $N_{fi,s,d} = 115,2$ kN. Funkcija rdeče barve pa označuje dejansko nosilnost lesenega stebra pri požaru.



Slika 5.1: Požarna odpornost obravnavanega lesenega stebra brez požarne zaščite.

Na podlagi rezultatov ugotovimo, da ima tak stebel požarno odpornost R45. Rezultati računa v Excelovem programu so v Prilogi B.1.

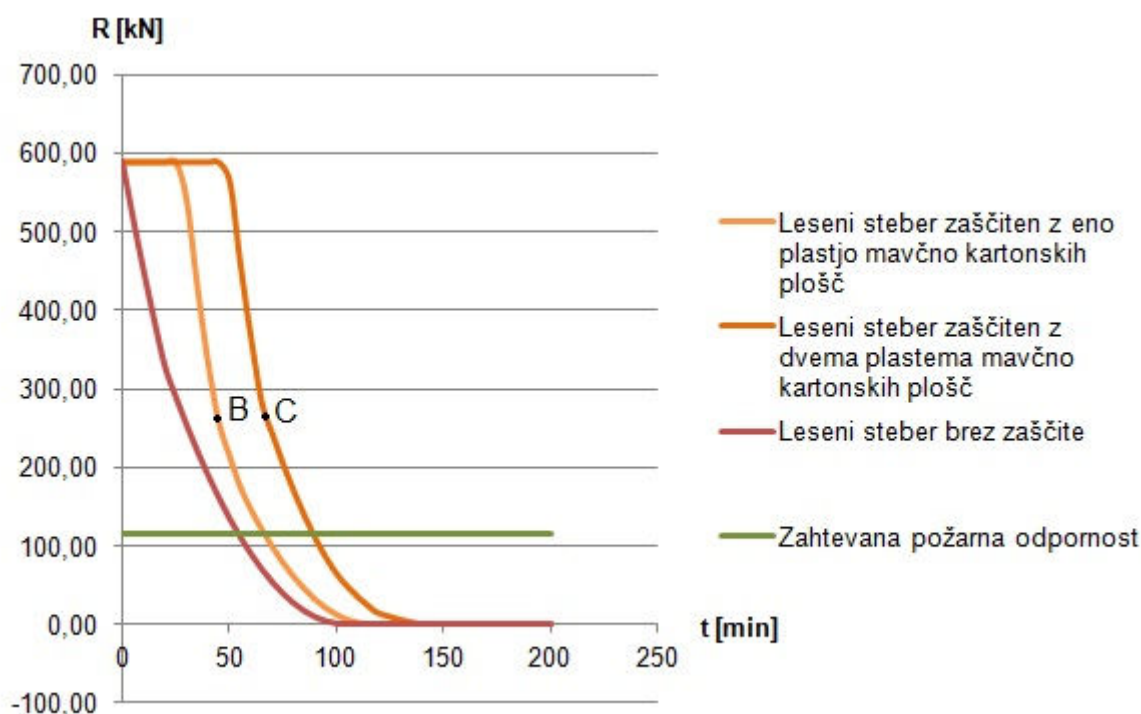
V točki A pride do preloma, kjer prične odpornost lesenega stebra počasneje padati. To se zgodi po 20-minutni izpostavljenosti standardnemu požaru. Do tega časa se je globina zoglenele plasti d_0 zmanjševala za faktor k_0 , kot to opisuje izraz (23). Po tem času se po standardu predpostavi, da je globina zoglenele plasti, ki nima več nobene nosilnosti, $d_0 = 0,7$. Zaradi tega pride do počasnejšega padanja nosilnosti lesenega stebra.

5.2 Požarno zaščiteni prerezi

V nadaljevanju so prikazani rezultati izračuna nosilnosti enakega lesenega stebra kot zgoraj le, da tokrat z uporabo različnih protipožarnih zaščitnih sredstev

5.2.1 Mavčno kartonske plošče

Na sliki 5.2 je na podlagi izračuna požarne odpornosti požarno zaščitenega izbranega lesenega stebra z eno in dvema plastema mavčno kartonskih plošč prikazano, kakšen je potek padanja nosilnosti le-tega. Za primerjavo je dodan še potek padanja nosilnosti požarno nezaščitenega lesenega stebra. Izračun za mavčno kartonske plošče debeline $h_p = 15$ mm. Zaščita s takimi ploščami za izbrani leseni stebel pomeni, da je njegova odpornost sedaj R60. Rezultati izračuna so v obliki tabel podani v prilogah B.2 in B.3.



Slika 5.2: Požarna odpornost obravnavanega lesenega stebra z in brez požarne zaščite. Požarna zaščita je iz ene in dveh plasti mavčno kartonskih plošč debeline 15 mm.

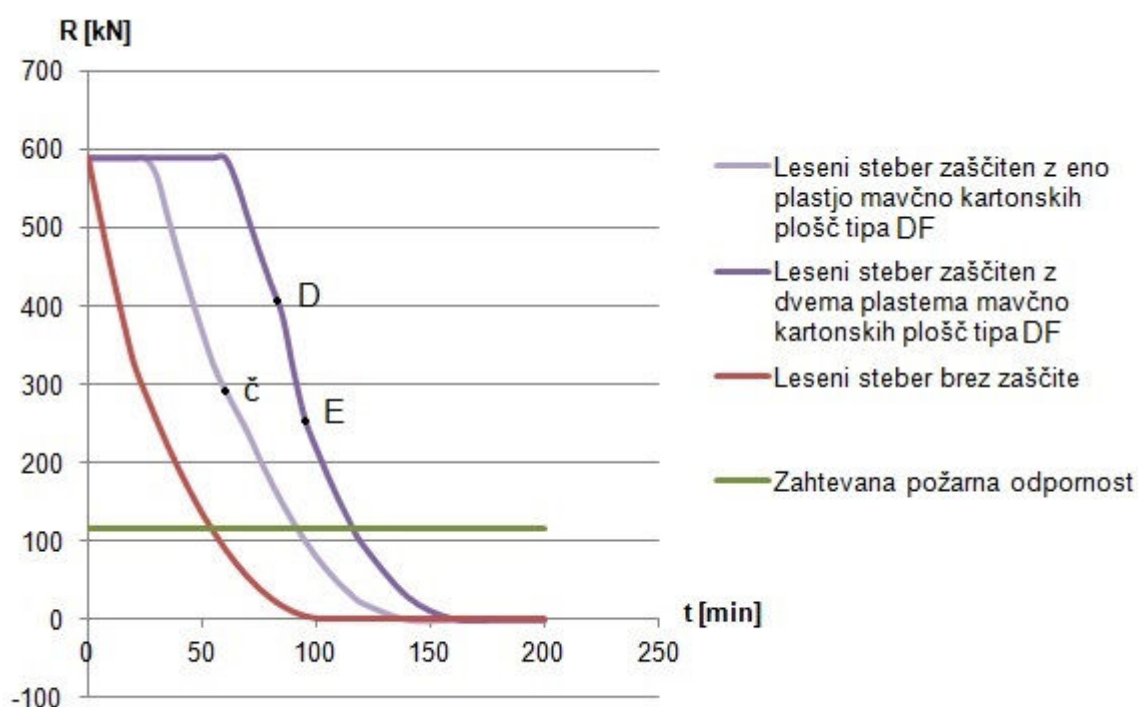
Najprej pogledamo funkcijo za stebel požarno zaščiten z eno plastjo mavčno kartonskih plošč. Dejansko stebel pridobi 15 min na odpornosti, kajti glede na izračunane vrednosti je nosilnost lesenega stebra brez požarne zaščite do 50 min, pri zaščitnem je ta čas 65 min. Glede na obliko funkcije zaščitenega stebra vidimo, da je to primer, kakor ga prikazuje slika 3.1. Pri tem sta čas pričetka oglenenja in čas odpovedi požarne zaščite enaka, izračunana po izrazu (6) $t_{ch} = t_f = 28$ min in limitni čas je $t_a = 43,6$ min po izrazu (4). Limitni čas t_a je na sliki 5.2 označen s točko B. To je prelom, ko se konča pospešeno oglenenje lesa s hitrostjo $\beta_{in} = 0,16$ cm/min in se nadaljuje z normalno hitrostjo $\beta_n = 0,08$ cm/min. Pospešeno oglenenje lesa se prične po tem, ko odpove požarna zaščita (glej sliko 3.3).

Funkcija za leseni stebel zaščiten z dvema plastema enakih mavčno kartonskih plošč prikazuje, da ima tako zaščiten prerez boljšo požarno odpornost. Sedaj je $t_{ch} = t_f = 49$ min in $t_a = 64,6$ min, kar lahko razberemo iz priloge B.3. Na sliki 5.3 je prelomna točka, ko se prične oglenenje prereza z normalno hitrostjo $\beta_n = 0,08$ cm/min, označena s C. Tudi v tem primeru je računska odpornost lesenega stebra R60, vendar je nosilnost ustrezna vse do 85 min, kar je kar 20 min več kakor pri eni plasti mavčno kartonskih plošč. Kljub razmeroma širokem spektru razreda požarne odpornosti, je meje potrebno postaviti, kar je v nacionalnem dokumentu (Uradni list RS št. 31/2004: Priloga 2) narejeno s pomočjo požarnih odpornostnih razredov lesenih konstrukcij.

Kot drugi primer požarne zaščite z mavčno kartonskimi ploščami je po standardu Evrokod 5 (EC 1995-1-2:2004) podana zaščita z mavčno kartonskimi ploščami tipa F. To pomeni, da ustrezajo omejitvam obstojnosti na visokih temperaturah, glede na standard SIST EN 520:2011. Za take plošče velja $t_{ch} < t_f$. Pri tem je t_{ch} izračuna glede na izraz (6).

Izberemo mavčno kartonske plošče tipa DF, katerih debelina znaša $h_p = 15$ mm. Odpornost tako zaščitenega izbranega lesenega stebra je prikazana na sliki 5.3.

Najprej pogledamo leseni stebel zaščiten z eno plastjo mavčno kartonskih plošč tipa DF. Pri tem je $t_{ch} = 28$ min in $t_f = t_a = 69,1$ min. Pride do posebnega primera, ko je čas odpovedi požarne zaščite enak limitnemu času. Do tega pride, ker je globina oglenjenja $d_{char} = 25$ mm dosežena, preden je v okolici lesenega elementa temperatura 1000 °C in preden je temperatura na površini stebra enaka temperaturi na površini mavčno kartonskih plošč. Prelom je zato, ker kljub temu, da požarna zaščita v resnici še ni odpovedala, računsko ne opravlja več funkcije požarne zaščite. Velja $t_f > t_a$. Ko je dosežena globina oglenjenja 25 mm, je hitrost oglenjenja enaka kakor pri nezaščitenih lesenih elementih. Zato je v takem primeru smiselno upoštevati $t_f = t_a$. Čas, ko pride do odpovedi požarne zaščite, izračunamo po



Slika 5.3: Požarna odpornost obravnavanega lesenega stebra z in brez požarne zaščite. Požarna zaščita je iz ene in dveh plasti mavčno kartonskih plošč tipa DF debeline 15 mm.

postopku, kakor za požarno zaščito iz kamene volne, opisanem v poglavju 5.2.3. Na sliki 5.3 lahko vidimo, kako se spreminja odpornost tako zaščenega izbranega lesenega stebra. Čas odpovedi požarne zaščite t_f in hkrati limitni čas t_a se odraža s prelomom funkcije v točki Č. Računsko je odpornost tako zaščenega stebra R90, kar je prikazano v prilogi B.4.

Prav tako slika 5.3 prikazuje, kako se spreminja nosilnost v primeru uporabe dveh plasti mavčno kartonskih plošč tipa DF. Tu je $t_{ch} = 61,6$ min, $t_f = 86,5$ min in $t_a = 92,7$ min glede na izraz (3). Natančnejši rezultati izračuna so v prilogi B.5. Točka D je prelom, ko pride do prehoda od počasnejšega oglenenja $\beta_n = 0,06$ cm/min, na pospešeno $\beta_{in} = 0,16$ cm/min. Pospešeno oglenenje se konča, ko je dosežen limitni čas t_a . Ta prelom je označen z E. Dosežena požarna odpornost je v tem primeru R90. Vidimo, da teoretično taka zaščita ne prispeva bistveno k požarni varnosti lesenega stebra. Vendar je potrebno dodati, kakor lahko vidimo iz slike 5.3, da je požarna odpornost v prvem primeru na skrajnem spodnjem robu požarnega odpornostnega razreda R90, v drugem, pa na skrajnem zgornjem robu istega odpornostnega razreda. Čas 15 min v primeru požara zagotovo pripomore k bolj varnemu in učinkovitemu delu gasilskih enot.

Primerjava odpornosti prikazanih na slikah 5.2 in 5.3 pokaže, da dodatna plast požarne zaščite zelo pripomore k odpornosti lesenega stebra, ne glede na vrsto mavčno kartonskih plošč.

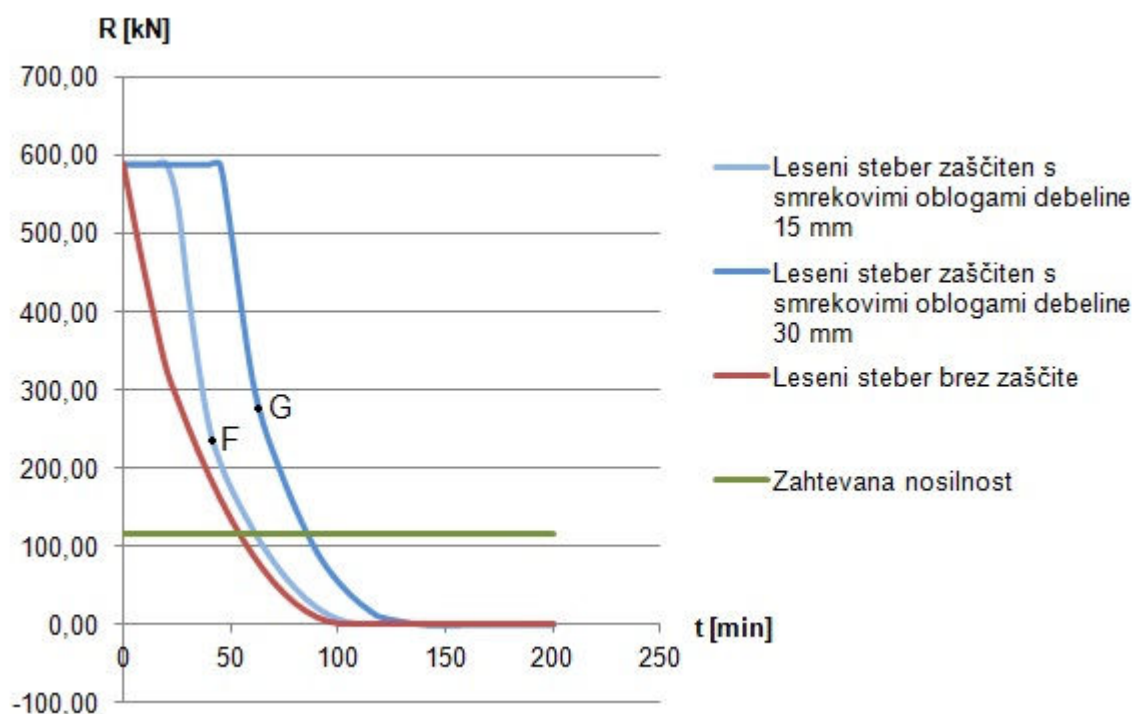
5.2.2 Lesene obloge

Izberemo požarno oblogo iz smrekovega lesa. Debelina smrekove obloge je 40 mm, širina 146 mm in dolžina 3 m. Za potrebe primerjave izračun naredimo za debelina smrekovih plošč 15 in 30 mm. Obložitev izbranega stebra zahteva vsaj pet takih oblog. Hitrost oglenenja smrekovega lesa pravokotno na vlakna je $\beta_n = 0,65$ mm/min. Tudi pri takih ploščah velja $t_{ch} = t_f$. Slika 5.4 prikazuje, kako se nosilnost zaščenega in nezaščenega prereza zmanjšuje s časom.

Najprej pogledamo primer smrekove obloge debeline 15 mm. Tu je $t_{ch} = t_f = 23,1$ min in $t_a = 38,7$ min glede na izraz (4). Glede na izračunane vrednosti v prilogi B.6 je tako zaščiten leseni steber v požarnem odpornostnem razredu R60. Z F je označena točka, ko pride do preloma in se oglenenje lesa zmanjša na enako hitrost kakor pri nezaščitenih prerezih $\beta_n = 0,08$ cm/min.

Pogledamo še smrekovo oblogo debeline 30 mm, ki se prav tako kategorizira v požarni odpornostni razred R60. Kakor pri mavčno kartonskih ploščah tipa DF (glej poglavje 5.2.1) je čas, ko lesen steber ne dosega več ustrezne nosilnosti, v primeru tanjše požarne zaščite na spodnjem robu, pri debelejši zaščiti pa na skrajnem zgornjem robu požarnega odpornostnega razreda. Za tako zaščiten izbran leseni steber velja $t_{ch} = t_f = 46,2$ min in limitni čas je $t_a = 61,8$ min glede na izraz (4). Točka G označuje prehod med pospešenim oglenenjem lesa in oglenenjem z normalno hitrostjo.

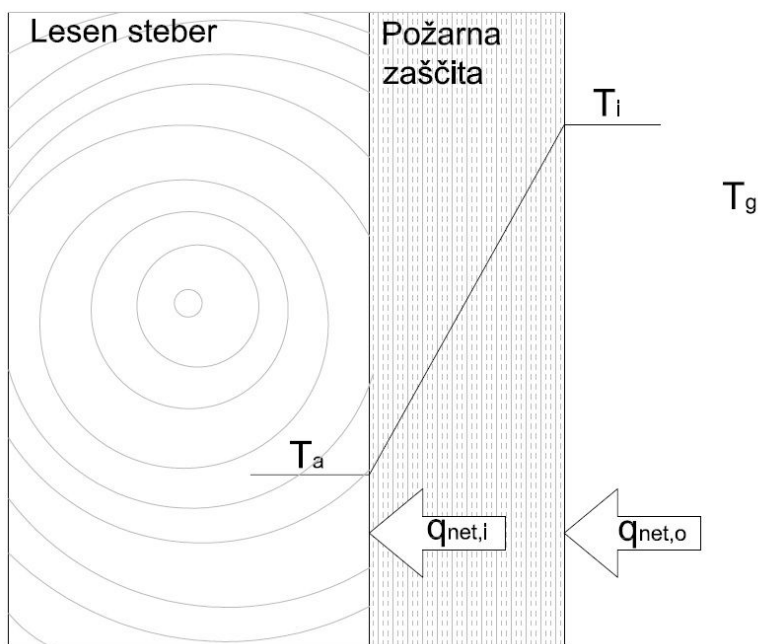
Na osnovi rezultatov lahko zaključimo, da v izbranem primeru uporaba lesenih oblog znatno pripomore k požarni odpornosti lesenega stebra.



Slika 5.4: Požarna odpornost obravnavanega lesenega stebra z in brez požarne zaščite. Požarna zaščita je iz smrekovih oblog debeline 15 in 30 mm.

5.2.3 Kamena volna

Za izračun časa odpovedi požarne zaščite t_f upoštevam standard Evrokod 1 (EN 1991-1-2:2002). V nadaljevanju je prikazana izpeljava za izračun temperature na površini lesenega elementa, ki je zaščiten s plastjo kamene volne. Slika 5.5 prikazuje temperaturni potek znotraj požarne zaščite. T_g je temperatura plinov v okolici, ki se s časom stopnjuje glede na standardno požarno krivuljo (slika 2.2). T_i je temperatura požaru izpostavljene površine požarne zaščite in T_a je temperatura na površini lesenega elementa. S $q_{net,o}$ je označena gostota toplotnega toka prevajanja toplote na površini požarne zaščite, medtem ko $q_{net,i}$ predstavlja toplotni tok znotraj požarne zaščite.



Slika 5.5: Potek izoterme po požarni zaščiti elementa s prikazano smerjo toplotnega toka

Predpostavimo, da pride do odpovedi požarne zaščite, ko je temperatura na obodu lesenega elementa enaka temperaturi na površini požarne zaščite, torej je $T_i = T_a$, ali ko je v okolici elementa dosežena temperatura $T_g = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, ali ko je dosežena globina oglenjenja $d_{char} = 25\text{ mm}$, torej velja $t_a = t_f$.

Za izračun temperature na izpostavljeni strani požarne zaščite je v standardu podan izraz

$$\dot{q}_{net,o} = \alpha_c(T_g - T_i) + \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma (T_g^4 - T_i^4), \quad (31)$$

pri čemer je α_c koeficient prenosa toplote s konvekcijo in je za zrak $25\text{ W/m}^2\text{K}$, ki v prvem delu enačbe predstavlja gostoto toplotnega toka s konvekcijo. V drugem delu računa je delež gostote toplotnega toka zaradi radiacije, kjer je Φ konfiguracijski faktor, katerega vrednost je, če ni drugače določeno v standardu, 1,0 kar velja tudi za obravnavano situacijo. ε_m je koeficient emisivnosti površine, ki je za izbrani primer 0,8. ε_f je faktor emisivnosti ognja, katerega vrednost je 1,0. σ je Stephan Boltzmanova konstanta, katere vrednost je $5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Potrebujemo še podatek o gostoti toplotnega toka v območju požarne zaščite. Na območju izolacijskega sloja predpostavimo stacionarno stanje, tako ne upoštevamo dela toplote, ki je potreben za segretje materiala zaščite. To zapišemo z enačbo

$$\frac{dT}{dt} = 0, \quad (32)$$

s čimer smo na varni strani. Privzamemo enodimenzionalno prevajanje toplote, pri katerem mora biti zadoščeno enakosti

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{q}_v - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0. \quad (33)$$

λ je prevodnostni koeficient sloja požarne zaščite. Vrednost $\dot{q}_v = 0$, ker nimamo nobenih notranjih ponorov ali virov toplote. Tretji del enačbe je glede na enačbo (32) na območju zaščite tudi enak 0. Potemtakem nam preostane le še prvi del enačbe, ki je odvod

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \rightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0. \quad (33.1)$$

Splošna rešitev (33.1) je

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= c_1 \\ T &= c_1 x + c_2. \end{aligned} \quad (33.2)$$

Z upoštevanjem robnih pogojev

$$\begin{aligned} x = 0 &\rightarrow T = T_i & x = \delta &\rightarrow T = T_a \\ c_2 &= T_i & c_1 \delta + T_i &= T_a \\ & & c_1 &= \frac{T_a - T_i}{\delta} \end{aligned}$$

kjer je δ debelina zaščitnega sloja v metrih, dobimo enačbo poteka temperature po plasti požarne zaščite kot

$$T(x) = T_i + \frac{T_a - T_i}{\delta} x. \quad (33.3)$$

Sedaj lahko zapišemo izraz (33.3) kot

$$\dot{q}_{net,i} = \frac{\lambda}{\delta} (T_i - T_a). \quad (34)$$

Imamo stacionarno stanje, zato mora veljati, da je količina dovedenega toplotnega toka zaradi požara izkazana z izrazom (31), enaka količini toplotnega toka, ki gre skozi požarno zaščito, glede na izraz (34). Za lažji račun razstavim razliko temperatur

$$T_g^4 - T_i^4 = (T_g^2 + T_i^2)(T_g + T_i)(T_g - T_i)$$

in enačim izraza (31) in (34) ter dobim

$$[\alpha_c + \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma (T_g^2 + T_i^2)(T_g + T_i)](T_g - T_i) = \frac{\lambda}{\delta} (T_i - T_a). \quad (35)$$

V enačbi (35) upoštevamo poenostavitev, da je $T_i = T_g$ samo v oglatem oklepaju. S tem dobimo največjo možno gostoto toplotnega toka zaradi požara. Enačba (35) tako dobi obliko

$$(\alpha_c + 4\Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma T_g^3)(T_g - T_i) = \frac{\lambda}{\delta} (T_i - T_a). \quad (35.1)$$

Iz take oblike lahko sedaj prvi oklepaj enačbe (35.1) izračunamo za vsak časovni interval

$$\alpha_c^* = \alpha_c + 4\Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma T_g^3 \quad (36)$$

in izpeljemo izraz za izračun temperature T_i

$$\alpha_c^* (T_g - T_i) = \frac{\lambda}{\delta} (T_i - T_a)$$

$$\delta \alpha_c^* T_g - \delta \alpha_c^* T_i = \lambda T_i - \lambda T_a$$

$$(\delta \alpha_c^* + \lambda) T_i = \delta \alpha_c^* T_g + \lambda T_a$$

$$T_i = \frac{\delta \alpha_c^* T_g + \lambda T_a}{\delta \alpha_c^* + \lambda}. \quad (37)$$

Sedaj to vstavimo v izraz (34) za izračun gostote toplotnega toka v požarni zaščiti in dobimo novo obliko enačbe

$$\dot{q}_{net,i} = \alpha_n (T_g - T_a), \quad (38)$$

pri čemer je faktor α_n izražen z izrazom

$$\alpha_n = \frac{\lambda \alpha_c^*}{\delta \alpha_c^* + \lambda}. \quad (39)$$

Preostane nam samo še izračun dejanske temperature na površini lesenega elementa. Najprej izračunamo dovedeno toploto Q skozi požarno zaščito glede na izraz

$$Q = \dot{q}_{net,i} * S * \Delta t, \quad (40)$$

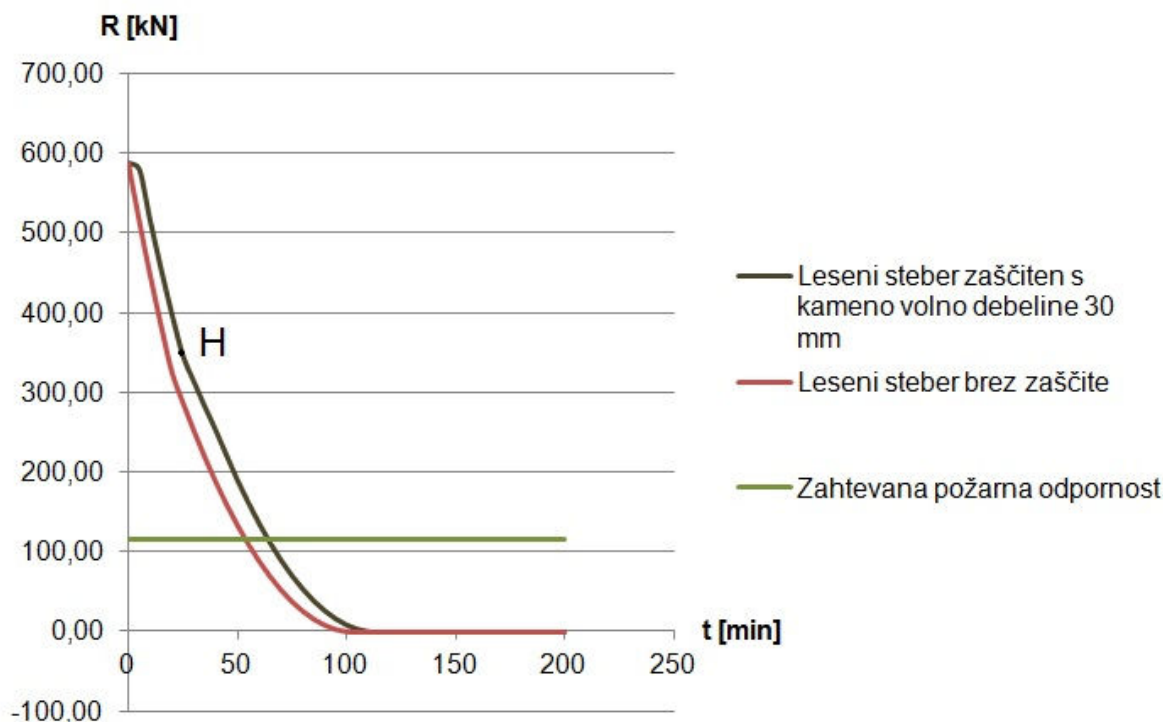
pri čemer je S površina izpostavljene požarne zaščite v m^2 in Δt je dolžina časovnega intervala v sekundah. S je zmnožek širine stebra b in višine stebra l . Časovni intervali Δt morajo biti zelo majhni. Za izbrani primer je v prvih dveh minutah ta interval 0,01 min, nato je do 15 min interval 1 min. Naprej so intervali dolgi 5 min. Na začetku morajo biti časovni intervali Δt krajši, ker je standardna požarna krivulja eksponentna funkcija in temperatura v prvih sekundah in minutah sunkovito naraste. Z izračunom toplote lahko sedaj izračunamo prirast temperature v časovnem intervalu Δt z izrazom

$$\Delta T = \frac{Q}{C}, \quad (41)$$

kjer je Q dovedena toplota (40) in C toplotna kapaciteta požarne zaščite. Toplotna kapaciteta je zmnožek specifične toplote in mase požarne zaščite.

Ko imamo izračunano temperaturo T_a , ki je seštevek ΔT in temperature prejšnjega časovnega intervala, lahko določimo čas, ko odpove požarna zaščita t_f .

Slika 5.6 prikazuje, kako se spreminja odpornost izbranega lesenega stebra zaščitenega s kameno volno. Izberemo požarno zaščito iz kamene volne debeline 30 mm. Za potrebe primerjave učinkovitosti požarnih zaščit, bi potrebovali tudi debelino 15 mm, vendar se take debeline kamene volne ne upoštevajo kot požarna zaščita. Najmanjša debelina kamene volne za protipožarne namene je 20 mm.



Slika 5.6: Požarna odpornost obravnavanega lesenega stebra z in brez požarne zaščite. Požarna zaščita je kamena volna debeline 30 mm.

Pogledamo, kaj velja za kameno volno debeline 30 mm. Glede na izraz (8) je $t_{ch} = 4,4$ min in $t_f = t_a = 41,6$ min glede na zgoraj opisan postopek. Čas odpovedi požarne zaščite je v tem primeru izbran kot čas, ko je dosežena globina oglenenja 25 mm. Zato velja enakost $t_a = t_f$. S pomočjo rezultatov v prilogi B.7 je čas odpornosti tako zaščitenega elementa enak R60. Točka H označuje, kje se počasnejše oglenenje lesa spremeni v enako kakor pri nezaščitenem lesenem stebru. Kamena volna ne predstavlja tako učinkovite zaščite, saj je počasnejše oglenenje v času $t_{ch} < t_f = t_a$ le za 0,01 cm/min bolj ugodno.

5.2.4 Intumescentne barve

Pri iskanju podatkov, potrebnih za izračun spreminjanja odpornosti izbranega lesenega stebra požarno zaščitenega z intumescentnimi barvami ne najdemo nobenih karakterističnih vrednosti materiala. Opisano je delovanje takih barv, ki ob izpostavljenosti visokim temperaturam nabreknejo. Tako se ustvari zогlenela plast sestavljena iz ogljika. Deluje podobno kakor zогlenela plast, ki nastaja pri oglenenju lesa, le da se ta ne odlušči in razpade v tako kratkem času. V literaturi podjetij, ki prodajajo intumescente barve, ne dobimo podatka o specifični toploti ali toplotni prevodnosti nabrekle požarne zaščite.

Intumescentne zaščitne barve se uporabljajo za notranjo požarno zaščito elementov. Površine elementov zaščitene z intumescentnimi barvami ne smejo biti izpostavljene temperaturam nižjim od 5 °C. Prav tako so neprimerne za uporabo v prostorih z visoko relativno vlažnostjo. Zaščitene površine ne smejo biti izpostavljene velikim mehanskim obremenitvam, kot so to lesene pohodne površine ali na površinah, ki so vir toplote.

Običajno se na površino, ki jo želimo zaščititi, nanese dva različna premaza. Prvi je osnovni, ki ima debeline v območju od 0,14 do 0,35 mm in ob izpostavljenosti nabrekne na do 100-krat večji volumen. Drugi pa se nanese kot zaščitna plast osnovni plasti. Ta je debeline od 0,03 do 0,05 mm.

Intumescentne barve so glede na evropsko klasifikacijo obnašanja materialov v primeru požara uvrščene v kategorijo B-s1-d0. Tabela 5.2 prikazuje, kako se uvrščajo materiali po evropski klasifikaciji. Materiali, za katere smo v poglavju 5.2 računali požarno odpornost, spadajo v kategorije A2, B in D.

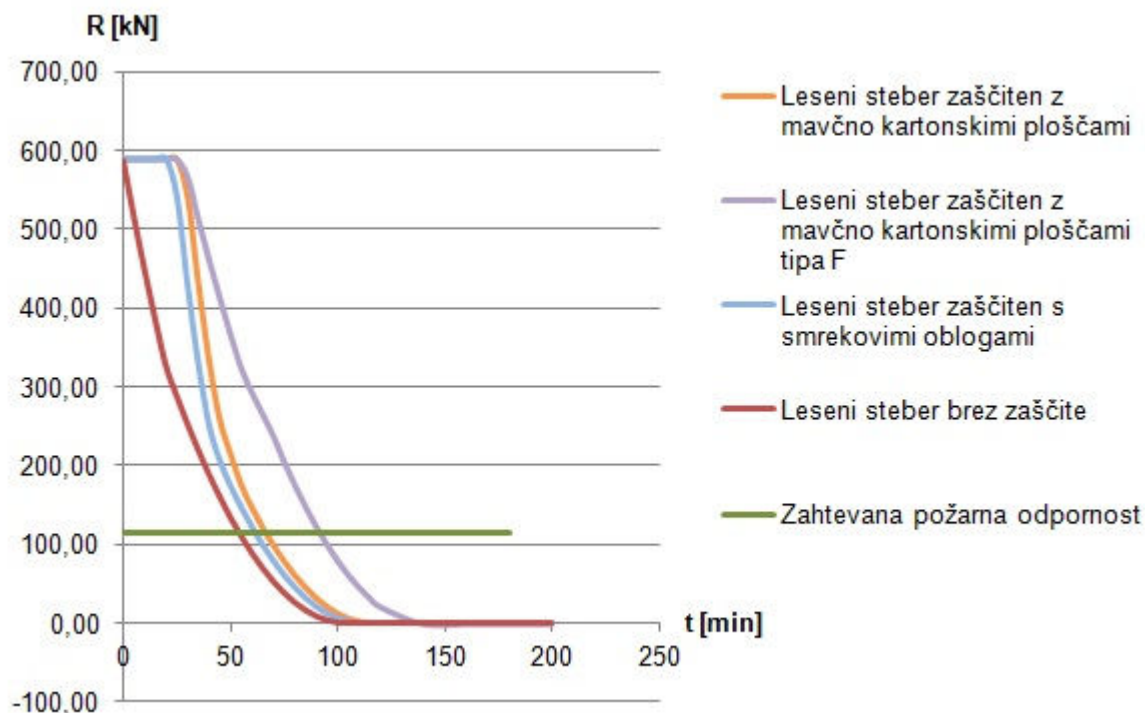
V literaturi največkrat najdemo informacijo, da se pri lesenih elementih, zaščenih z intumescentnimi barvami, čas odpornosti tega podaljša do 60 min. Ta podatek je za primerjavo učinkovitosti požarnih zaščit premalo nenatančen, zato gav primerjavi ne bomo upoštevali.

Preglednica 5.2: Klasifikacija obnašanja materialov ob izpostavljenosti ognju

Evropska klasifikacija	Kategorija dima	Klasifikacija gorečih padajočih delcev	Negorljivo	Majhen plamen	Tipični primer materialov
A1	-	-	x	-	Kamen, Beton
A2	s1, s2 ali s3	d0, d1 ali d2	x	-	Mavčne plošče, Mineralna volna
B	s1, s2 ali s3	d0, d1 ali d2	-	x	Mavčne plošče, ognjeodporen les
C	s1, s2 ali s3	d0, d1 ali d2	-	x	Zaščite na mavčnih ploščah
D	s1, s2 ali s3	d0, d1 ali d2	-	x	Les, leseni paneli
E	-	- ali d	-	x	Nekateri sintetični polimeri
F	-	-	-	-	Zmogljivost ni določena

5.3 Primerjava učinkovitosti uporabe požarnih zaščit

V nadaljevanju primerjamo požarno odpornost izbranega lesenega elementa za različne vrste in debeline požarne zaščite.



Slika 5.7: Požarna odpornost obravnavanega lesenega stebra z in brez požarne zaščite. Požarne zaščite so debeline 15 mm.

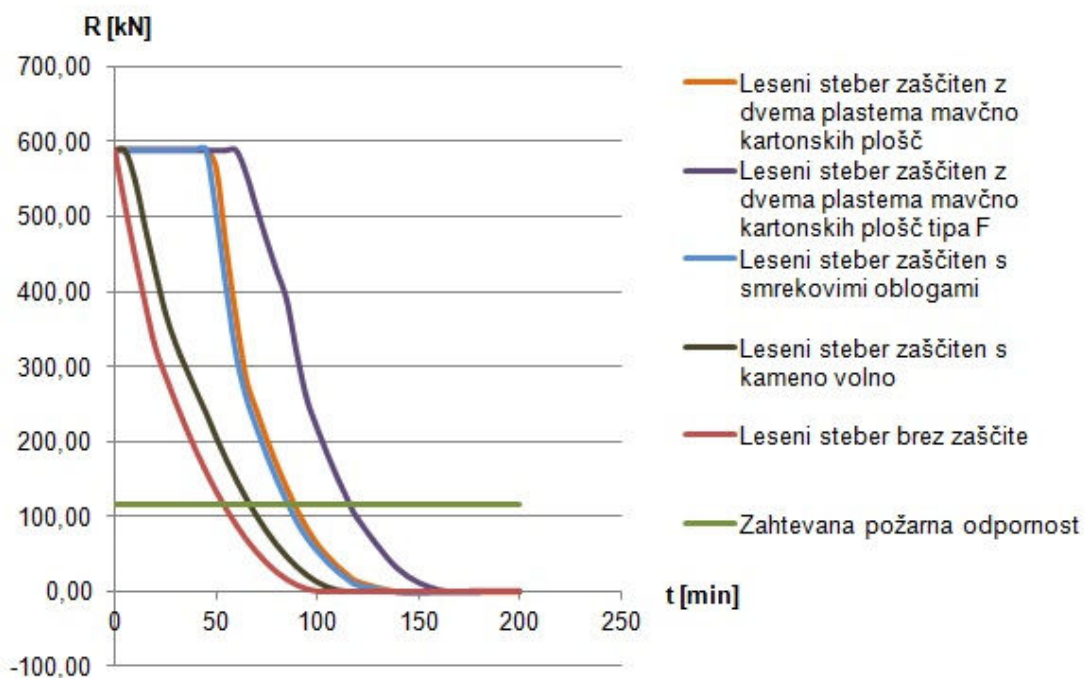
Na sliki 5.7 lahko vidimo, kako se s časom spreminja odpornost obravnavanega lesenega stebra brez požarne zaščite in s požarno zaščito debeline 15 mm. Najboljšo zaščito predstavljajo mavčno kartonske plošče tipa DF. Zaščiti z mavčno kartonskimi ploščami in lesenimi smrekovimi oblogami sta skoraj enako učinkoviti.

V preglednici 5.3 je prikazano, kakšne so razlike v razredu požarne odpornosti različnih materialov, in izračunan čas odpornosti izbranih požarnih zaščit. V primeru nezaščitenega prereza je izračunan čas odpornosti nekaj manj kot 60 min. Izračunane odpornosti požarno zaščitenega lesenega stebra kažejo, da se lesene obloge in mavčno kartonske plošče obnašajo zelo podobno. Izračun pokaže, da mavčno kartonske plošče pripomorejo k približno 5 min več odpornosti kot smrekove lesene obloge.

Preglednica 5.3: Razredi požarne odpornosti in izračunani časi požarne odpornosti za izbrani leseni element požarno zaščiten z 15 mm debelimi oblogami.

	Nezaščiteni izbrani leseni steber	Zaščiteni izbrani leseni steber		
		Mavčno kartonske plošče debeline 15 mm	Mavčno kartonske plošče tipa F debeline 15 mm	Smrekove lesene obloge debeline 15 mm
Razred požarne odpornosti	R45	R60	R90	R60
Izračunani čas odpornosti [min]	53	66	91	61

Slika 5.8 prikazuje, kako se s časom spreminja odpornost izbranega lesenega stebra zaščitenega z različnimi požarnimi zaščitami debeline 30 mm. S slike 5.8 je razvidno, da najboljšo požarno zaščito predstavljajo mavčno kartonske plošče tipa DF. Za izbrani primer



Slika 5.8: Požarna odpornost obravnavanega lesenega stebra z in brez požarne zaščite. Požarne zaščite so debeline 30 mm.

lesenega stebra je najslabša izbira požarna zaščita iz kamene volne. Ta zelo malo pripomore k odpornosti lesenega stebra, čeprav v času, ko je nosilnost nižja od zahtevane, še vedno ne pride do odpovedi požarne zaščite.

Za lažjo predstavo so podatki o izračunani odpornosti podani v preglednici 5.4. Pričakujemo, da se bo čas odpornosti podaljšal še za enkrat toliko kakor pri enakih zaščitah debeline 15 mm. Najprej primerjamo razrede požarne odpornosti. Vidimo, da je situacija podobna kakor pri požarnih zaščitah debeline 15 mm. Vendar moramo pogledati, kako je z izračunanimi časi. Pri mavčno kartonskih in smrekovih lesenih ploščah je izračunani čas le za 5 min prekratek, da bi jih lahko uvrstili v višji požarni odpornostni razred. Prav tako velja za mavčno kartonske plošče tipa DF. Rezultati kažejo, da je v obravnavanem primeru dejanska požarna odpornost za od 22 do 25 min večja od tistih, ki jih določa njihov požarni razred. To je že pomemben časovni interval. Kamena volna predstavlja relativno slabo požarno zaščito, saj je izračunani čas njene odpornosti pri debelini 30 mm enak kakor to velja za mavčno kartonske plošče pri debelini 15 mm.

Preglednica 5.4: Razredi požarne odpornosti in izračunani časi požarne odpornosti za izbrani leseni element požarno zaščiten z 30 mm debelimi oblogami

	Nezaščiten izbrani leseni steber	Zaščiten izbrani leseni steber			
		Dve plasti mav. kart. plošč deb. 15 mm	Dve plasti mav. kart. plošč tipa F deb. 15 mm	Smrekove lesene obloge deb. 30 mm	Kamena volna deb. 30 mm
Razred požarne odpornosti	R45	R60	R90	R60	R60
Izračunani čas odpornosti [min]	53	88	116	85	66

6 ZAKLJUČEK

Požarna zaščita pomembno vpliva na požarno odpornost lesenih konstrukcij. V vseh primerih uporabe protipožarnih zaščitnih sredstev se je izkazalo, da se požarna odpornost lesenih stebrov poveča. Kot najbolj učinkovito sredstvo se izkažejo mavčno kartonske plošče tipa DF. Pri tem je zanimivo, kako lahko dodatek, kot so steklena vlakna pri mavčno kartonskih ploščah, še dodatno pripomore k izboljšanju požarne zaščite. Pri mavčno kartonskih ploščah tipa DF lahko ta razlika obsega cel požarni odpornostni razred.

Zanimivo je tudi, kako tališče požarne zaščite ne vpliva veliko na učinkovitost zaščite. Presenetljivo je, da je požarna zaščita iz kamene volne manj učinkovita od ostalih. Prodajalci izdelka poudarjajo predvsem tališče kamene volne, ki je višje od 1000 °C, vendar so izračuni pokazali, da to ni najpomembnejši podatek. Bolj pomembna lastnost je toplotna prevodnost in z njo povezana specifična toplota materiala.

Les je po mojem mnenju izredno primeren material tudi za protipožarno gradnjo. Z ustrezno izbiro lesa in njegovo zaščito lahko dosežemo požarne odpornosti primerljive s konstrukcijami iz drugih materialov.

Program, ki sem ga sestavila za potrebe izračuna izbranega lesenega stebra, lahko uporabimo za zelo različne primere. Spreminjamo lahko lastnosti in dimenzije stebra, obtežbe na steber ter vrsto in debelino požarne zaščite. Na osnovi tega lahko s pomočjo omenjenega programa določimo požarno odpornost v skladu z obveznimi standardi Evrokoda.

Na območju Slovenije imamo velike zaloge lesa. V splošnem se tega zelo malo poslužujemo in kvaliteten konstrukcijski les izvažamo v tujino. Preveč se še vedno gradi z materiali, ki potrebujejo pred vgradnjo v konstrukcijo veliko obdelave. Glede na trenutno stanje tehnologije za izdelavo in zaščito lesenih konstrukcij, je taka gradnja najbolj okolju prijazna in enostavna.

7 VIRI

EN 1991-1-2:2002. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Action on structures exposed to fire.

EN 1995-1-2:2004. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design.

Fireretard.com. 2013. Fireretard
<http://www.fireretard.com/main.php?langid=1&itemid=4&subitem=17> (Pridobljeno 18. 9. 2013)

KNAUF 2010. Požarna zaščita gradbenih konstrukcij s sistemi KNAUF na osnovi evropskih standardov EN. Katalog Knauf 2010. Ljubljana, Knauf Ljubljana d.o.o.: str. 66 – 67.

Knauf Slovenija, 2013. Knauf Ljubljana d.o.o.. <http://www.knauf.si/index.php> (Pridobljeno 24. 8. 2013)

Lopatič J. 2012. Lesene konstrukcije. Študijsko gradivo OG_B. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 112 str.

Nullifire®, 2013. Timber intumescent coating.
http://www.nullifire.com/products/intumescent_coating_system_w.php (Pridobljeno 18. 9. 2013)

Požarna klasifikacija stavb in delov stavb. Uradni list RS št. 31/2004: Priloga 2

SIST EN 1995-1-1:2005. Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

Srpčič S. 2013. Požarna odpornost konstrukcij. Neobjavljeno študijsko gradivo.

Tabela požarno manj zahtevni in požarno zahtevni objekti. Uradni list RS št. 31/2004: Priloga 1

Tervol gradbene izolacije, 2013. Trgovsko podjetje Astra NOVA d.o.o..
<http://www.astranova.si/tervol.html> (Pridobljeno 27. 8. 2013)

Viličnik A. 2008. Požarna zaščita za les. Predstavitev izdelkov za požarno zaščito družinskega podjetja chemcolor. Ljubljana: 11 str.

Zdrava hiša, 2013. Zeleni zajec d.o.o.. <http://zdravahisa.si/> (Pridobljeno 26. 8. 2013)

Zeleni zajec, naravni materiali, d.o.o.. 2013. Maloprodajni cenik LES 2013 Sibirski macesen, smreka, bor. Ljubljana, Zeleni zajec, naravni materiali, d.o.o.: str. 9.

Ta stran je namenoma prazna.

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: TRDNOSTNI RAZREDI – KARAKTERISTIČNE IN PROJEKTNE VREDNOSTI EN 1995-1-1:2005

PRILOGA B: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA

PRILOGA B.1: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI ZA NEZAŠČITEN LESEN STEBER

PRILOGA B.2: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA
ZAŠČITENEGA S PLASTJO MAVČNO KARTONSKIH PLOŠČ

PRILOGA B.3: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA
ZAŠČITENEGA Z DVEMA PLASTEMA MAVČNO KARTONSKIH PLOŠČ

PRILOGA B.4: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA
ZAŠČITENEGA S PLASTO MAVČNO KARTONSKIH PLOŠČ TIPA DF

PRILOGA B.5: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA
ZAŠČITENEGA Z DVEMA PLASTEMA MAVČNO KARTONSKIH PLOŠČ
TIPA DF

PRILOGA B.6: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA
ZAŠČITENEGA S SMREKOVIMI OBLOGAMI DEBELINE 15 MM

PRILOGA B.7: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA
ZAŠČITENEGA S SMREKOVIMI OBLOGAMI DEBELINE 30 MM

PRILOGA B.8: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA
ZAŠČITENEGA S KAMENO VOLNO DEBELINE 30 MM

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA A: TRDNOSTNI RAZREDI – KARAKTERISTIČNE IN PROJEKTNE VREDNOSTI PO STANDARDU EN 1995-1-1:2005

EN 338:2003, EN 1995-1-1:2005																				
TRDNOSTNI RAZREDI - karakteristične in projektne vrednosti																				
Trdnost [N/cm ²]		Iglavci in topolovina																Listavci		
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50			D60
Upogib	f _{m,k}	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2700	3000	3500	4000	4500	5000	3000	3500	4000	5000	6000	7000	
	P	646	738	831	923	1015	1108	1246	1385	1615	1846	2077	2308	1385	1615	1846	2308	2769	3231	
	f _{m,d}	L	754	862	969	1077	1185	1292	1454	1615	1885	2154	2423	2692	1615	1885	2154	2692	3231	3769
	M	862	985	1108	1231	1354	1477	1662	1846	2154	2462	2769	3077	3462	2077	2423	2769	3462	4154	4846
	S	969	1108	1246	1385	1523	1662	1869	2077	2423	2769	3115	3462	2077	2423	2769	3462	4154	4846	
Nateg, paralelno	f _{t,0,k}	800	1000	1100	1200	1300	1400	1600	1800	2100	2400	2700	3000	1800	2100	2400	3000	3600	4200	
	P	369	462	508	554	600	646	738	831	969	1108	1246	1385	831	969	1108	1385	1662	1938	
	f _{t,0,d}	L	431	538	592	646	700	754	862	969	1131	1292	1454	1615	969	1131	1292	1615	1938	2262
	M	492	615	677	738	800	862	985	1108	1292	1477	1662	1846	2154	1292	1477	1662	2077	2492	2908
	S	554	692	762	831	900	969	1108	1246	1454	1662	1869	2077	2426	1454	1662	2077	2492	2908	
Nateg, pravokotno	f _{t,90,k}	40	50	50	50	50	50	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
	P	18	23	23	23	23	23	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	
	f _{t,90,d}	L	22	27	27	27	27	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	
	M	25	31	31	31	31	31	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	
	S	28	35	35	35	35	35	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	
Tlak, paralelno	f _{c,0,k}	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2500	2600	2700	2900	2300	2500	2600	2900	3200	3400	
	P	738	785	831	877	923	969	1015	1062	1154	1200	1246	1338	1062	1154	1200	1338	1477	1569	
	f _{c,0,d}	L	862	915	969	1023	1077	1131	1185	1238	1346	1400	1454	1562	1238	1346	1400	1562	1723	1831
	M	985	1046	1108	1169	1231	1292	1354	1415	1538	1600	1662	1785	1415	1538	1600	1785	1969	2092	
	S	1108	1177	1246	1315	1385	1454	1523	1592	1731	1800	1869	2008	1592	1731	1800	2008	2215	2354	
Tlak, pravokotno	f _{c,90,k}	200	220	220	230	240	250	260	270	280	290	310	320	800	840	880	970	1050	1350	
	P	92	102	102	106	111	115	120	125	129	134	143	148	369	388	406	448	485	623	
	f _{c,90,d}	L	108	118	118	124	129	135	140	145	151	156	167	172	431	452	474	522	565	727
	M	123	135	135	142	148	154	160	166	172	178	191	197	492	517	542	597	646	831	
	S	138	152	152	159	166	173	180	187	194	201	215	222	554	582	609	672	727	935	
Strig	f _{v,k}	170	180	200	220	240	250	280	300	340	380	380	380	300	340	380	460	530	600	
	P	78	83	92	102	111	115	129	138	157	175	175	175	138	157	175	212	245	277	
	f _{v,d}	L	92	97	108	118	129	135	151	162	183	205	205	162	183	205	248	285	323	
	M	105	111	123	135	148	154	172	185	209	234	234	234	185	209	234	283	326	369	
	S	118	125	138	152	166	173	194	208	235	263	263	263	208	235	263	318	367	415	
Deformabilnost-modul [kN/cm ²]																				
Modul el., paralelno																				
Modul el., paralelno																				
Modul el., pravokotno																				
Strižni modul																				
Gostota [kg/m ³]																				
Gostota, karakteristična																				
Gostota, povprečna																				

Modifikacijski faktorji:

Za masiven les, lepljeni lamelirani les in iz furnijev lepljeni les

1. 2. uporabnostni razred (do 20% vlage lesa)

Razred tr. k_{mod}

P 0.60

L 0.70

M 0.80

S 0.90

P ... stalna obtežba

L ... dolgotrajna (do 10 let)

M ... srednje dol. (do 6 mes.)

S ... kratkotrajna (do 1 tedna)

Varnostni faktorji za material:

γ_m = 1,30 masivni les, iverke, priključki

γ_m = 1,25 lepljeni lamelirani les

γ_m = 1,20 iz furnijev lepljeni les

Varnostni faktorji za obtežbo:

γ_g = 1,0 / 1,35

γ_q = 1,50

Koeficient lezenja - trajna obtežba:

za masivni in lepljeni lamelirani les, ter iz furnijev lepljeni les

Up. razred k_{def}

1. 0.60

2. 0.80

3. 2.00

Pri spreminljivih obtežbah:

splošno: ψ₂ k_{def}

Modifikacijski faktorji:

Za masiven les, lepjeni lamelirani les in iz furnirjev lepjeni les

1. 2. uporabnostni razred

(do 20% vlage lesa)

Razred tr.

k_{mod}

P 0,60

L 0,70

M 0,80

S 0,90

P ... stalna obtežba

L ... dolgotrajna (do 10 let)

M ... srednje dol. (do 6 mes.)

S ... kratkotrajna (do 1 tedna)

Varnostni faktorji za material:

$\gamma_m = 1,30$ masivni les, ivrke, priključki

$\gamma_m = 1,25$ lepjen lameliran les

$\gamma_m = 1,20$ iz furnirjev lepjen les

Varnostni faktorji za obtežbo:

$\gamma_g = 1,0 / 1,35$

$\gamma_q = 1,50$

Koeficient lezenja - trajna obtežba:

za masivni in lepjeni lamelirani les, ter

iz furnirjev lepjeni les

Up. razred

k_{def}

1. 0,60

2. 0,80

3. 2,00

Pri spreminjenih obtežbah:

splošno: $\psi_2 \cdot k_{def}$

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA B.1: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI ZA NEZAŠČITEN LESEN STEBER
DIMENZIJ 18/18/210 CM.

t [min]	dchar,n [cm]	k0	k0*d0 [cm]	def [cm]	bef [cm]	hef [cm]	Aef,t [cm ²]	Rfi,t,d [kN]	Doseganje nosilnosti	Razred požarne odpornosti
0	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	R45
5	0,4	0,25	0,18	0,6	16,9	16,9	283,9	515,97	OK	
10	0,8	0,50	0,35	1,2	15,7	15,7	246,5	447,95	OK	
15	1,2	0,75	0,53	1,7	14,6	14,6	211,7	384,73	OK	
20	1,6	1,00	0,70	2,3	13,4	13,4	179,6	326,32	OK	
25	2,0	1,00	0,70	2,7	12,6	12,6	158,8	288,52	OK	
30	2,4	1,00	0,70	3,1	11,8	11,8	139,2	253,04	OK	
35	2,8	1,00	0,70	3,5	11,0	11,0	121,0	219,89	OK	
40	3,2	1,00	0,70	3,9	10,2	10,2	104,0	189,07	OK	
45	3,6	1,00	0,70	4,3	9,4	9,4	88,4	160,58	OK	
50	4,0	1,00	0,70	4,7	8,6	8,6	74,0	134,41	OK	
55	4,4	1,00	0,70	5,1	7,8	7,8	60,8	110,57	NI OK	
60	4,8	1,00	0,70	5,5	7,0	7,0	49,0	89,05	NI OK	
65	5,2	1,00	0,70	5,9	6,2	6,2	38,4	69,86	NI OK	
70	5,6	1,00	0,70	6,3	5,4	5,4	29,2	52,99	NI OK	
75	6,0	1,00	0,70	6,7	4,6	4,6	21,2	38,45	NI OK	
80	6,4	1,00	0,70	7,1	3,8	3,8	14,4	26,24	NI OK	
85	6,8	1,00	0,70	7,5	3,0	3,0	9,0	16,36	NI OK	
90	7,2	1,00	0,70	7,9	2,2	2,2	4,8	8,80	NI OK	
95	7,6	1,00	0,70	8,3	1,4	1,4	2,0	3,56	NI OK	
100	8,0	1,00	0,70	8,7	0,6	0,6	0,4	0,65	NI OK	
105	8,4	1,00	0,70	9,1	0	0	0	0,00	NI OK	
110	8,8	1,00	0,70	9,5	0	0	0	0,00	NI OK	
115	9,2	1,00	0,70	9,9	0	0	0	0,00	NI OK	
120	9,6	1,00	0,70	10,3	0	0	0	0,00	NI OK	
140	11,2	1,00	0,70	11,9	0	0	0	0,00	NI OK	
160	12,8	1,00	0,70	13,5	0	0	0	0,00	NI OK	
180	14,4	1,00	0,70	15,1	0	0	0	0,00	NI OK	
200	16,0	1,00	0,70	16,7	0	0	0	0,00	NI OK	
220	17,6	1,00	0,70	18,3	0	0	0	0,00	NI OK	
240	19,2	1,00	0,70	19,9	0	0	0	0,00	NI OK	
260	20,8	1,00	0,70	21,5	0	0	0	0,00	NI OK	
280	22,4	1,00	0,70	23,1	0	0	0	0,00	NI OK	
300	24,0	1,00	0,70	24,7	0	0	0	0,00	NI OK	
320	25,6	1,00	0,70	26,3	0	0	0	0,00	NI OK	
340	27,2	1,00	0,70	27,9	0	0	0	0,00	NI OK	
360	28,8	1,00	0,70	29,5	0	0	0	0,00	NI OK	
380	30,4	1,00	0,70	31,1	0	0	0	0,00	NI OK	

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA B.2: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA DIMENZIJ
18/18/210 CM ZAŠČITENEGA S PLASTJO MAVČNO KARTONSKIH PLOŠČ DEBELINE 15
MM.

t [min]	dchar [cm]	k0	k0*d0 [cm]	def [cm]	bef [cm]	hef [cm]	Aef,t [cm ²]	Rfi,t,d [kN]	Doseganje nosilnosti	Razred požarne odpornosti
0	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	R60
5	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	
10	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	
15	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	
20	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	
25	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	
30	0,3	0,07	0,05	0,4	17,3	17,3	297,9	541,39	OK	
35	1,1	0,25	0,18	1,3	15,4	15,4	237,5	431,55	OK	
40	1,9	0,43	0,30	2,2	13,6	13,6	183,9	334,15	OK	
45	2,6	0,61	0,43	3,0	11,9	11,9	142,3	258,65	OK	
50	3,0	0,79	0,55	3,6	10,9	10,9	118,4	215,12	OK	
55	3,4	0,96	0,68	4,1	9,8	9,8	96,6	175,60	OK	
60	3,8	1,00	0,70	4,5	9,0	9,0	80,6	146,55	OK	
65	4,2	1,00	0,70	4,9	8,2	8,2	66,9	121,60	OK	
70	4,6	1,00	0,70	5,3	7,4	7,4	54,5	98,98	NI OK	
75	5,0	1,00	0,70	5,7	6,6	6,6	43,3	78,68	NI OK	
80	5,4	1,00	0,70	6,1	5,8	5,8	33,4	60,71	NI OK	
85	5,8	1,00	0,70	6,5	5,0	5,0	24,8	45,07	NI OK	
90	6,2	1,00	0,70	6,9	4,2	4,2	17,5	31,75	NI OK	
95	6,6	1,00	0,70	7,3	3,4	3,4	11,4	20,76	NI OK	
100	7,0	1,00	0,70	7,7	2,6	2,6	6,7	12,10	NI OK	
105	7,4	1,00	0,70	8,1	1,8	1,8	3,2	5,76	NI OK	
110	7,8	1,00	0,70	8,5	1,0	1,0	1,0	1,75	NI OK	
115	8,2	1,00	0,70	8,9	0,2	0,2	0,0	0,06	NI OK	
120	8,6	1,00	0,70	9,3	0	0	0	0	NI OK	
140	10,2	1,00	0,70	10,9	0	0	0	0	NI OK	
160	11,8	1,00	0,70	12,5	0	0	0	0	NI OK	
180	13,4	1,00	0,70	14,1	0	0	0	0	NI OK	
200	15,0	1,00	0,70	15,7	0	0	0	0	NI OK	
220	16,6	1,00	0,70	17,3	0	0	0	0	NI OK	
240	18,2	1,00	0,70	18,9	0	0	0	0	NI OK	
260	19,8	1,00	0,70	20,5	0	0	0	0	NI OK	
280	21,4	1,00	0,70	22,1	0	0	0	0	NI OK	
300	23,0	1,00	0,70	23,7	0	0	0	0	NI OK	
320	24,6	1,00	0,70	25,3	0	0	0	0	NI OK	
340	26,2	1,00	0,70	26,9	0	0	0	0	NI OK	
360	27,8	1,00	0,70	28,5	0	0	0	0	NI OK	
380	29,4	1,00	0,70	30,1	0	0	0	0	NI OK	

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA B.3: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA DIMENZIJ
18/18/210 CM ZAŠČITENEGA Z DVEMA PLASTEMA MAVČNO KARTONSKIH PLOŠČ
DEBELINE 15 MM.

t [min]	dchar [cm]	k0	k0*d0 [cm]	def [cm]	bef [cm]	hef [cm]	Aef,t [cm ²]	Rfi,t,d [kN]	Doseganje nosilnosti	Razred požarne odpornosti
0	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	R60
5	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	
10	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	
15	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	
20	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	
25	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	
30	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	
35	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	
40	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	
45	0	0	0	0	18,0	18,0	324,0	588,81	OK	
50	0,2	0,02	0,01	0,2	17,7	17,7	311,6	566,22	OK	
55	1,0	0,12	0,09	1,1	15,9	15,9	253,1	459,93	OK	
60	1,8	0,22	0,16	1,9	14,2	14,2	200,7	364,67	OK	
65	2,5	0,33	0,23	2,8	12,5	12,5	155,8	283,18	OK	
70	2,9	0,43	0,30	3,2	11,5	11,5	133,2	242,01	OK	
75	3,3	0,53	0,37	3,7	10,6	10,6	112,3	204,08	OK	
80	3,7	0,63	0,44	4,2	9,7	9,7	93,2	169,38	OK	
85	4,1	0,73	0,51	4,6	8,7	8,7	75,9	137,91	OK	
90	4,5	0,84	0,59	5,1	7,8	7,8	60,4	109,68	NI OK	
95	4,9	0,94	0,66	5,6	6,8	6,8	46,6	84,67	NI OK	
100	5,3	1,00	0,70	6,0	5,9	5,9	35,3	64,12	NI OK	
105	5,7	1,00	0,70	6,4	5,1	5,1	26,4	48,01	NI OK	
110	6,1	1,00	0,70	6,8	4,3	4,3	18,8	34,23	NI OK	
115	6,5	1,00	0,70	7,2	3,5	3,5	12,5	22,77	NI OK	
120	6,9	1,00	0,70	7,6	2,7	2,7	7,5	13,64	NI OK	
140	8,5	1,00	0,70	9,2	0	0	0	0	NI OK	
160	10,1	1,00	0,70	10,8	0	0	0	0	NI OK	
180	11,7	1,00	0,70	12,4	0	0	0	0	NI OK	
200	13,3	1,00	0,70	14,0	0	0	0	0	NI OK	
220	14,9	1,00	0,70	15,6	0	0	0	0	NI OK	
240	16,5	1,00	0,70	17,2	0	0	0	0	NI OK	
260	18,1	1,00	0,70	18,8	0	0	0	0	NI OK	
280	19,7	1,00	0,70	20,4	0	0	0	0	NI OK	
300	21,3	1,00	0,70	22,0	0	0	0	0	NI OK	
320	22,9	1,00	0,70	23,6	0	0	0	0	NI OK	
340	24,5	1,00	0,70	25,2	0	0	0	0	NI OK	
360	26,1	1,00	0,70	26,8	0	0	0	0	NI OK	
380	27,7	1,00	0,70	28,4	0	0	0	0	NI OK	

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA B.4: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA DIMENZIJ
18/18/210 CM ZAŠČITENEGA S PLASTO MAVČNO KARTONSKIH PLOŠČ TIPA DF
DEBELINE 15 MM

t [min]	dchar [cm]	k0	k0*d0 [cm]	def [cm]	bef [cm]	hef [cm]	Aef,t [cm ²]	Rfi,t,d [kN]	Doseganje nosilnosti	Razred požarne odpornosti
0	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	R90
5	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
10	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
15	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
20	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
25	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
30	0,1	0,07	0,05	0,2	17,7	17,7	311,8	566,57	OK	
35	0,4	0,25	0,18	0,6	16,8	16,8	282,2	512,84	OK	
40	0,7	0,43	0,30	1,0	15,9	15,9	254,1	461,79	OK	
45	1,0	0,61	0,43	1,5	15,1	15,1	227,5	413,42	OK	
50	1,3	0,79	0,55	1,9	14,2	14,2	202,3	367,72	OK	
55	1,6	0,96	0,68	2,3	13,4	13,4	178,7	324,70	OK	
60	2,0	1,00	0,70	2,6	12,7	12,7	161,5	293,52	OK	
65	2,3	1,00	0,70	2,9	12,1	12,1	146,4	266,11	OK	
70	2,6	1,00	0,70	3,3	11,5	11,5	131,3	238,63	OK	
75	3,0	1,00	0,70	3,7	10,7	10,7	113,6	206,47	OK	
80	3,4	1,00	0,70	4,1	9,9	9,9	97,2	176,64	OK	
85	3,8	1,00	0,70	4,5	9,1	9,1	82,1	149,14	OK	
90	4,2	1,00	0,70	4,9	8,3	8,3	68,2	123,96	OK	
95	4,6	1,00	0,70	5,3	7,5	7,5	55,6	101,11	NI OK	
100	5,0	1,00	0,70	5,7	6,7	6,7	44,3	80,58	NI OK	
105	5,4	1,00	0,70	6,1	5,9	5,9	34,3	62,38	NI OK	
110	5,8	1,00	0,70	6,5	5,1	5,1	25,6	46,51	NI OK	
115	6,2	1,00	0,70	6,9	4,3	4,3	18,1	32,96	NI OK	
120	6,6	1,00	0,70	7,3	3,5	3,5	12,0	21,74	NI OK	
140	8,2	1,00	0,70	8,9	0	0	0	0	NI OK	
160	9,8	1,00	0,70	10,5	0	0	0	0	NI OK	
180	11,4	1,00	0,70	12,1	0	0	0	0	NI OK	
200	13,0	1,00	0,70	13,7	0	0	0	0	NI OK	
220	14,6	1,00	0,70	15,3	0	0	0	0	NI OK	
240	16,2	1,00	0,70	16,9	0	0	0	0	NI OK	
260	17,8	1,00	0,70	18,5	0	0	0	0	NI OK	
280	19,4	1,00	0,70	20,1	0	0	0	0	NI OK	
300	21,0	1,00	0,70	21,7	0	0	0	0	NI OK	
320	22,6	1,00	0,70	23,3	0	0	0	0	NI OK	
340	24,2	1,00	0,70	24,9	0	0	0	0	NI OK	
360	25,8	1,00	0,70	26,5	0	0	0	0	NI OK	
380	27,4	1,00	0,70	28,1	0	0	0	0	NI OK	

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA B.5: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA DIMEZNIJ
18/18/210 CM ZAŠČITENEGA Z DVEMA PLASTEMA MAVČNO KARTONSKIH PLOŠČ
TIPA DF DEBELINE 15 MM

t [min]	dchar [cm]	k0	k0*d0 [cm]	def [cm]	bef [cm]	hef [cm]	Aef,t [cm ²]	Rfi,t,d [kN]	Doseganje nosilnosti	Razred požarne odpornosti
0	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	R90
5	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
10	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
15	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
20	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
25	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
30	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
35	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
40	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
45	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
50	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
55	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
60	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
65	0,2	0,06	0,04	0,2	17,5	17,5	306,6	557,14	OK	
70	0,5	0,14	0,10	0,6	16,8	16,8	281,8	512,16	OK	
75	0,8	0,22	0,15	1,0	16,1	16,1	258,1	469,08	OK	
80	1,1	0,30	0,21	1,3	15,3	15,3	235,4	427,88	OK	
85	1,4	0,38	0,27	1,7	14,6	14,6	213,8	388,59	OK	
90	2,1	0,46	0,32	2,4	13,2	13,2	174,4	316,97	OK	
95	2,7	0,54	0,38	3,1	11,9	11,9	140,8	255,92	OK	
100	3,1	0,62	0,44	3,5	11,0	11,0	120,0	218,03	OK	
105	3,5	0,70	0,49	4,0	10,0	10,0	100,8	183,18	OK	
110	3,9	0,79	0,55	4,4	9,1	9,1	83,3	151,36	OK	
115	4,3	0,87	0,61	4,9	8,2	8,2	67,4	122,57	OK	
120	4,7	0,95	0,66	5,4	7,3	7,3	53,3	96,81	NI OK	
140	6,3	1,00	0,70	7,0	4,0	4,0	16,2	29,46	NI OK	
160	7,9	1,00	0,70	8,6	1	0,8	0,7	1,24	NI OK	
180	9,5	1,00	0,70	10,2	0	0	0	0,00	NI OK	
200	11,1	1,00	0,70	11,8	0	0	0	0,00	NI OK	
220	12,7	1,00	0,70	13,4	0	0	0	0,00	NI OK	
240	14,3	1,00	0,70	15,0	0	0	0	0,00	NI OK	
260	15,9	1,00	0,70	16,6	0	0	0	0,00	NI OK	
280	17,5	1,00	0,70	18,2	0	0	0	0,00	NI OK	
300	19,1	1,00	0,70	19,8	0	0	0	0,00	NI OK	
320	20,7	1,00	0,70	21,4	0	0	0	0,00	NI OK	
340	22,3	1,00	0,70	23,0	0	0	0	0,00	NI OK	
360	23,9	1,00	0,70	24,6	0	0	0	0,00	NI OK	
380	25,5	1,00	0,70	26,2	0	0	0	0,00	NI OK	

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA B.6: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA DIMENZIJ
18/18/210 CM ZAŠČITENEGA S SMREKOVIMI OBLOGAMI DEBELINE 15 MM.

t [min]	dchar [cm]	k0	k0*d0 [cm]	def [cm]	bef [cm]	hef [cm]	Aef,t [cm ²]	Rfi,t,d [kN]	Doseganje nosilnosti	Razred požarne odpornosti
0	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	R60
5	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
10	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
15	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
20	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
25	0,3	0	0	0	17,3	17,3	298,2	541,89	OK	
30	1,1	0	0	1,3	15,4	15,4	236,1	429,01	OK	
35	1,9	0,52	0,36	2,3	13,5	13,5	181,2	329,31	OK	
40	2,6	0,73	0,51	3,1	11,8	11,8	138,4	251,57	OK	
45	3,0	0,95	0,67	3,7	10,7	10,7	113,7	206,60	OK	
50	3,4	1,00	0,70	4,1	9,8	9,8	95,9	174,26	OK	
55	3,8	1,00	0,70	4,5	9,0	9,0	80,9	146,95	OK	
60	4,2	1,00	0,70	4,9	8,2	8,2	67,1	121,97	OK	
65	4,6	1,00	0,70	5,3	7,4	7,4	54,6	99,31	NI OK	
70	5,0	1,00	0,70	5,7	6,6	6,6	43,5	78,98	NI OK	
75	5,4	1,00	0,70	6,1	5,8	5,8	33,6	60,97	NI OK	
80	5,8	1,00	0,70	6,5	5,0	5,0	24,9	45,29	NI OK	
85	6,2	1,00	0,70	6,9	4,2	4,2	17,6	31,94	NI OK	
90	6,6	1,00	0,70	7,3	3,4	3,4	11,5	20,91	NI OK	
95	7,0	1,00	0,70	7,7	2,6	2,6	6,7	12,21	NI OK	
100	7,4	1,00	0,70	8,1	1,8	1,8	3,2	5,84	NI OK	
105	7,8	1,00	0,70	8,5	1,0	1,0	1,0	1,79	NI OK	
110	8,2	1,00	0,70	8,9	0,2	0,2	0	0,07	NI OK	
115	8,6	1,00	0,70	9,3	0	0	0	0	NI OK	
120	9,0	1,00	0,70	9,7	0	0	0	0	NI OK	
140	10,6	1,00	0,70	11,3	0	0	0	0	NI OK	
160	12,2	1,00	0,70	12,9	0	0	0	0	NI OK	
180	13,8	1,00	0,70	14,5	0	0	0	0	NI OK	
200	15,4	1,00	0,70	16,1	0	0	0	0	NI OK	
220	17,0	1,00	0,70	17,7	0	0	0	0	NI OK	
240	18,6	1,00	0,70	19,3	0	0	0	0	NI OK	
260	20,2	1,00	0,70	20,9	0	0	0	0	NI OK	
280	21,8	1,00	0,70	22,5	0	0	0	0	NI OK	
300	23,4	1,00	0,70	24,1	0	0	0	0	NI OK	
320	25,0	1,00	0,70	25,7	0	0	0	0	NI OK	
340	26,6	1,00	0,70	27,3	0	0	0	0	NI OK	
360	28,2	1,00	0,70	28,9	0	0	0	0	NI OK	
380	29,8	1,00	0,70	30,5	0	0	0	0	NI OK	

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA B.7: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA DIMENZIJ
18/18/210 CM ZAŠČITENEGA S SMREKOVIMI OBLOGAMI DEBELINE 30 MM.

t [min]	dchar [cm]	k0	k0*d0 [cm]	def [cm]	bef [cm]	hef [cm]	Aef,t [cm ²]	Rfi,t,d [kN]	Doseganje nosilnosti	Razred požarne odpornosti
0	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	R60
5	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
10	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
15	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
20	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
25	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
30	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
35	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
40	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
45	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	
50	0,6	0,08	0,06	0,7	16,7	16,7	277,3	503,95	OK	
55	1,4	0,19	0,13	1,5	14,9	14,9	222,0	403,51	OK	
60	2,2	0,30	0,21	2,4	13,1	13,1	172,9	314,22	OK	
65	2,8	0,41	0,29	3,0	11,9	11,9	141,9	257,91	OK	
70	3,2	0,52	0,36	3,5	11,0	11,0	120,1	218,35	OK	
75	3,6	0,63	0,44	4,0	10,0	10,0	100,2	182,08	OK	
80	4,0	0,73	0,51	4,5	9,1	9,1	82,0	149,10	OK	
85	4,4	0,84	0,59	4,9	8,1	8,1	65,7	119,42	OK	
90	4,8	0,95	0,67	5,4	7,2	7,2	51,2	93,03	NI OK	
95	5,2	1,00	0,70	5,9	6,3	6,3	39,5	71,78	NI OK	
100	5,6	1,00	0,70	6,3	5,5	5,5	30,1	54,67	NI OK	
105	6,0	1,00	0,70	6,7	4,7	4,7	21,9	39,88	NI OK	
110	6,4	1,00	0,70	7,1	3,9	3,9	15	27,42	NI OK	
115	6,8	1,00	0,70	7,5	3,1	3,1	9,5	17,29	NI OK	
120	7,2	1,00	0,70	7,9	2,3	2,3	5,2	9,49	NI OK	
140	8,8	1,00	0,70	9,5	0	0	0	0	NI OK	
160	10,4	1,00	0,70	11,1	0	0	0	0	NI OK	
180	12,0	1,00	0,70	12,7	0	0	0	0	NI OK	
200	13,6	1,00	0,70	14,3	0	0	0	0	NI OK	
220	15,2	1,00	0,70	15,9	0	0	0	0	NI OK	
240	16,8	1,00	0,70	17,5	0	0	0	0	NI OK	
260	18,4	1,00	0,70	19,1	0	0	0	0	NI OK	
280	20,0	1,00	0,70	20,7	0	0	0	0	NI OK	
300	21,6	1,00	0,70	22,3	0	0	0	0	NI OK	
320	23,2	1,00	0,70	23,9	0	0	0	0	NI OK	
340	24,8	1,00	0,70	25,5	0	0	0	0	NI OK	
360	26,4	1,00	0,70	27,1	0	0	0	0	NI OK	
380	28,0	1,00	0,70	28,7	0	0	0	0	NI OK	

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA B.8: REZULTATI RAČUNA NOSILNOSTI LESENEGA STEBRA DIMENZIJ
18/18/210 CM ZAŠČITENEGA S KAMENO VOLNO DEBELINE 30 MM.

t [min]	dchar [cm]	k0	k0*d0 [cm]	def [cm]	bef [cm]	hef [cm]	Aef,t [cm ²]	Rfi,t,d [kN]	Doseganje nosilnosti	Razred požarne odpornosti
0	0	0	0	0	18	18	324	588,81	OK	R60
5	0	0	0	0,1	17,9	17,9	319,8	581,17	OK	
10	0	0	0	0,6	16,9	16,9	284,3	516,64	OK	
15	0,7	0,53	0,37	1,1	15,8	15,8	250,9	455,91	OK	
20	1,0	0,78	0,55	1,6	14,8	14,8	219,5	398,97	OK	
25	1,4	1,00	0,70	2,1	13,8	13,8	191,4	347,85	OK	
30	1,7	1,00	0,70	2,4	13,2	13,2	173,3	314,88	OK	
35	2,1	1,00	0,70	2,8	12,5	12,5	156,0	283,55	OK	
40	2,4	1,00	0,70	3,1	11,8	11,8	139,7	253,86	OK	
45	2,8	1,00	0,70	3,5	11,1	11,1	122,3	222,33	OK	
50	3,2	1,00	0,70	3,9	10,3	10,3	105,3	191,33	OK	
55	3,6	1,00	0,70	4,3	9,5	9,5	89,5	162,66	OK	
60	4,0	1,00	0,70	4,7	8,7	8,7	75,0	136,31	OK	
65	4,4	1,00	0,70	5,1	7,9	7,9	61,8	112,29	NI OK	
70	4,8	1,00	0,70	5,5	7,1	7,1	49,9	90,60	NI OK	
75	5,2	1,00	0,70	5,9	6,3	6,3	39,2	71,23	NI OK	
80	5,6	1,00	0,70	6,3	5,5	5,5	29,8	54,19	NI OK	
85	6,0	1,00	0,70	6,7	4,7	4,7	21,7	39,48	NI OK	
90	6,4	1,00	0,70	7,1	3,9	3,9	14,9	27,09	NI OK	
95	6,8	1,00	0,70	7,5	3,1	3,1	9,4	17,02	NI OK	
100	7,2	1,00	0,70	7,9	2,3	2,3	5,1	9,29	NI OK	
105	7,6	1,00	0,70	8,3	1,5	1,5	2,1	3,88	NI OK	
110	8,0	1,00	0,70	8,7	0,7	0,7	0,4	0,79	NI OK	
115	8,4	1,00	0,70	9,1	0	0	0	0	NI OK	
120	8,8	1,00	0,70	9,5	0	0	0	0	NI OK	
140	10,4	1,00	0,70	11,1	0	0	0	0	NI OK	
160	12,0	1,00	0,70	12,7	0	0	0	0	NI OK	
180	13,6	1,00	0,70	14,3	0	0	0	0	NI OK	
200	15,2	1,00	0,70	15,9	0	0	0	0	NI OK	
220	16,8	1,00	0,70	17,5	0	0	0	0	NI OK	
240	18,4	1,00	0,70	19,1	0	0	0	0	NI OK	
260	20,0	1,00	0,70	20,7	0	0	0	0	NI OK	
280	21,6	1,00	0,70	22,3	0	0	0	0	NI OK	
300	23,2	1,00	0,70	23,9	0	0	0	0	NI OK	
320	24,8	1,00	0,70	25,5	0	0	0	0	NI OK	
340	26,4	1,00	0,70	27,1	0	0	0	0	NI OK	
360	28,0	1,00	0,70	28,7	0	0	0	0	NI OK	
380	29,6	1,00	0,70	30,3	0	0	0	0	NI OK	